

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Année 1913

N°

THÈSE

POUR

LE DOCTORAT EN MÉDECINE

PRÉSENTÉE

Par M. Henri LAUGIER

Né le 5 Août 1888, à Mane (Basses-Alpes)

VITESSE D'EXCITABILITÉ & COURANTS INDUITS

MÉTHODES NOUVELLES EN ELECTRODIAGNOSTIC

TRAVAIL DES LABORATOIRES DE PHYSIOLOGIE GÉNÉRALE DU MUSÉUM
ET DE LA CLINIQUE DES MALADIES NERVEUSES DE LA SALPÊTRIÈRE

Président : CHARLES RICHET, professeur

PARIS

Imprimerie E. RAVILLY

27, RUE NICOLO

1913

LE DOYEN : M. LANDOUZY.

PROFESSEURS : MM.

Anatomie	NICOLAS.
Physiologie	Ch. RICHET.
Physique médicale	WEISS.
Chimie organique et chimie générale	DESGREZ.
Parasitologie et histoire naturelle médicale	BLANCHARD.
Pathologie et thérapeutique générales	ACHARD.
Pathologie médicale	WIDAL.
	TEISSIER.
Pathologie chirurgicale	LEJARS.
Anatomie pathologique	P. MARIE.
Histologie	PRENANT
Opérations et appareils	HARTMANN.
Pharmacologie et matière médicale	POUCHET.
Thérapeutique	MARFAN.
Hygiène	CHANTEMESSE.
Médecine légale	THOINOT.
Histoire de la médecine et de la chirurgie	LETULLE.
Pathologie expérimentale et comparée	ROGER.
	DEBOVE.
Clinique médicale	LANDOUZY.
	GILBERT.
	CHAUFFARD.
	HUTINEL.
Maladies des enfants	G. BALLET.
Clinique des maladies mentales et des maladies de de l'encéphale	GAUCHER.
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques	DEJERINE.
Clinique des maladies du système nerveux	DELBET.
Clinique chirurgicale	QUENU.
	RECLUS.
	N.
Clinique ophtalmologique	De LAPERSONNE.
Clinique des maladies des voies urinaires	LEGUEU.
	BAR.
Clinique d'accouchements	PINARD.
	RIBEMONT-DESSAIGNE.
Clinique gynécologique	POZZI.
Clinique chirurgicale infantile	KIRMISSON.
Clinique thérapeutique	A. ROBIN.

AGRÉGÉS EN EXERCICE :

MM.	MM.	MM.	MM.
BALTHAZARD.	DUVAL (Pierre).	LEQUEUX.	RATHERY.
BERNARD.	GOUGEROT.	LÉRI.	RATTERER.
BRANCA.	GRÉGOIRE.	LOEPER.	RICHAUD.
BRINDEAU.	GUENIOT.	MACAIGNE.	ROUSSY.
BROCA. (André).	GUILLAIN.	MAILLARD.	ROUVIÈRE.
BRUMPT.	JEANNIN.	MORESTIN.	SCHWARTZ.
CAMUS.	JOUSSET (André).	MULON.	SICARD.
CARNOT.	LABBÉ (Marcel).	NICLOUX.	TERRIEN.
CASTAIGNE.	LANGLOIS.	NOBECOURT.	TIFFENEAU.
CHEVASSU.	LAIGNEL-LAVASTINE.	OKINCZYC.	ZIMMERN.
CLAUDE.	LECÈNE.	OMBREMANNE.	
COUVELAIRE.	LENORMANT.	PROUST.	

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'École a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A mon père et à ma mère,

*Comme un faible témoignage,
de profonde, reconnaissante et
inaltérable affection.*

H. L.

*
* * *

Arrivé au terme de mes études médicales, j'adresse mes remerciements les plus vifs à mes maîtres de la Faculté de Médecine et des hôpitaux, qui m'ont accueilli avec bienveillance dans leurs cours, leurs laboratoires ou leurs services hospitaliers.

Monsieur le professeur Ch. Richet m'a donné déjà plusieurs fois, en un court espace de temps, des preuves du plus bienveillant intérêt; tout récemment encore, en m'attribuant, dans un laboratoire qu'il dirige, une tâche que je considère comme une mission de confiance, il m'a donné une marque d'active sympathie; — il a bien voulu accepter la présidence de cette thèse; il sait quelle reconnaissance je lui en ai.

J'ai pu maintes fois au cours de mes études apprécier l'active et attentive sollicitude de Messieurs les doyens Debove et Landouzy; je leur adresse mes remerciements les plus vifs.

J'ai passé une année d'externat chez M. le professeur Roger et une année chez M. le professeur Déjerine; grâce à la bienveillance de ces deux maîtres, qui m'ont ouvert en toute liberté leurs laboratoires, j'ai toujours pu dans les hôpitaux me livrer à la recherche scientifique, ce qui est, je puis le dire, ma plus grande joie. Les quelques mois que j'ai passés dans le service du professeur Roger, et dans son petit laboratoire de l'hôpital de la Charité, compteront parmi les plus heureux et les plus fructueux de mon séjour hospitalier; c'est au cours de l'année que j'ai passée à la Clinique Charcot, chez M. le professeur Déjerine, que j'ai pu recueillir la plupart des faits qui forment le sujet de cette thèse : que Monsieur le professeur Roger et Monsieur le professeur Déjerine veuillent bien accepter ici l'expression de mon affectueuse reconnaissance.

Au laboratoire de physiologie de la Sorbonne, où j'ai travaillé depuis mon arrivée à Paris, j'ai profité de l'enseignement de M. le professeur Dastre; il m'a accepté dans son laboratoire, il m'a maintes fois témoigné l'intérêt qu'il porte à mon travail, je le prie d'accepter mes plus vifs remerciements.

Je veux dire enfin tout ce que je dois à Monsieur le professeur Lapicque. Pendant cinq ans, j'ai travaillé sous sa direction immédiate, à la Sorbonne et au Muséum d'Histoire naturelle; c'est à lui que je dois tout ce que je sais en électrophysiologie; ceux-là seuls qui ont travaillé dans son laboratoire savent quelle atmosphère de cordialité et d'affectueuse collaboration y règne entre le maître et les élèves, et combien y est grande la joie de tous au travail. A ce maître qui a contribué d'une façon si forte à ma formation intellectuelle, et à qui je dois un appui moral qui m'a été précieux en maintes circonstances, j'exprime ici toute ma profonde et durable reconnaissance.

Pour tous mes maîtres, je voudrais que cette thèse fut un premier et modeste témoignage de mon amour passionné pour la recherche scientifique.

*
**

La partie expérimentale (3^e partie) de cette thèse a été faite en collaboration avec le docteur Bourguignon. Je lui exprime ici tous mes remerciements pour son active collaboration; quelques-uns des faits exposés dans cette troisième partie n'ont pas encore été publiés; ils n'en appartiennent pas moins à M. Bourguignon comme à moi.

INTRODUCTION

Dire que la physiologie et la pathologie doivent se prêter un mutuel concours, et doivent unir leurs efforts pour la découverte et l'étude des lois biologiques, c'est énoncer une vérité si banale, que je ne me résignerais certes pas à le faire, si l'expérience n'avait montré que trop souvent ces deux sciences poursuivent dans une funeste indépendance leurs chemins solitaires.

Le fait est particulièrement net si l'on considère les deux branches de la connaissance qui nous occupent, l'électrophysiologie d'une part, et l'électrothérapie d'autre part. On peut dire que depuis les travaux mémorables de Brenner, Baierlacher, Eulenburg, Erb, qui fondèrent l'électrodiagnostic tel qu'on le pratique encore aujourd'hui, sur les bases physiologiques relativement sûres établies par Pflüger, par Chauveau, par Helmholtz, les ponts se sont trouvés en fait coupés entre les électrophysiologistes et les électrothérapeutes, et les deux sciences se sont développées d'une façon autonome et divergente.

Divergente parce que les buts où tendent les électrothérapeutes et les électrophysiologistes sont essentiellement différents. Les électrothérapeutes sont préoccupés surtout d'obtenir une constance instrumentale parfaite qui leur permette de recueillir sur des malades différents des résultats comparables les uns aux autres, des résultats susceptibles de les renseigner sur l'état relatif des muscles et des tissus qu'ils observent. Aussi leurs efforts se sont portés vers un perfectionnement de la technique qui permît aux observateurs d'obtenir une constance instrumentale aussi exacte que possible. Dès lors, en possession d'une instrumentation fixe, et d'ailleurs rudimentaire, ils doivent l'utiliser toujours sui-

vant la même méthode, toujours suivant la même technique. Les indications d'Erb sont à cet égard extrêmement nettes et précises; il écrit : (1)

« Une règle principale dont je ne saurais trop vous recommander l'observance est celle-ci : *explorez toujours suivant une seule et même méthode, et suivant un seul mode d'expérimentation*; choisissez toujours le même procédé; il faudrait même si c'était possible, employer sans cesse les mêmes appareils, du moins quand il s'agit d'expériences ayant un but scientifique... »

Les physiologistes au contraire, désireux surtout de pénétrer le déterminisme intime des phénomènes biologiques, s'efforcent de varier tous les jours, les méthodes, les dispositifs, les schémas expérimentaux; toute leur ingéniosité se déploie pour tendre incessamment des pièges nouveaux aux lois qu'ils supposent, afin de retrouver sous la diversité des circonstances où elles se manifestent, la permanence des lois biologiques.

Ainsi constituées avec des buts si différents et des méthodes si nettement opposées, l'électrophysiologie et l'électropathologie se sont développées d'une façon autonome, et les fruits qu'elles ont produits n'ont rien de commun.

Observant avec leur technique immobile, les expériences si complexes, et à inconnues si nombreuses que constituent les cas pathologiques, les électrothérapeutes ont recueilli un matériel extrêmement considérable, très riche et très varié, de faits, d'observations, minutieusement décrits, dans leurs différentes modalités, leurs formes, leurs différentes évolutions possibles. Et l'électropathologie est aujourd'hui constituée essentiellement par un recueil de faits, judicieusement mis en œuvre pour l'électrodiagnostic, mais faits restés à l'état de constatations empiriques, faits empiriquement clas-

(1) W. Erb. Traité d'Electrothérapie. Traduction française Rueff, page 132, 1884, Paris

sés, et n'ayant pas servi de matériaux pour des interprétations générales, ou pour des analyses précises du déterminisme profond des phénomènes.

Cependant, tandis que l'Electrodiagnostic se pratique aujourd'hui, essentiellement, comme le pratiquait Erb au début de ses recherches, l'Electrophysiologie a considérablement progressé. Les lois qui président à la naissance de l'excitation dans les nerfs et dans les muscles ont été étudiées avec une instrumentation de plus en plus variée et délicate (condensateurs, rhéotomes variés depuis le rhéotome rudimentaire de Fick, jusqu'au rhéotome balistique de Weiss, appareils permettant de produire des courants lentement croissants de formes diverses, etc.) et la nature même du mécanisme par l'intermédiaire duquel l'électricité excite les nerfs, a été aperçue d'une façon si suggestive, et si féconde en vérifications avec l'hypothèse de Nernst, que les phénomènes si mystérieux de l'excitation et de l'influx nerveux semblent bien être à l'heure actuelle quelques-uns des phénomènes physiologiques les plus voisins d'être ramenés à un déterminisme purement physico-chimique.

On trouvera dans cette thèse, une tentative, pour appliquer à l'électropathologie, restée en dehors de ce mouvement scientifique, une des notions les plus solidement établies par les recherches électrophysiologiques des dix dernières années, et pour rétablir, sur ce point précis, l'étroite collaboration qui devrait unir sans cesse les sciences physiologiques et les sciences pathologiques.

*
* *

Quelle est donc cette notion ?

L'une des acquisitions les plus importantes de l'Electrophysiologie moderne, a été de montrer que l'excitabilité d'un tissu n'est pas suffisamment caractérisée, quand on a fait au point excité la détermination d'une hauteur de seuil; d'une part, la hauteur des seuils a été démontrée sous la dépendance étroite des contin-

gences expérimentales; d'autre part la théorie a montré, et ces considérations seront développées au cours de cette thèse, que même si l'on arrivait à déterminer un seul objectif, — chose impossible à penser — le seuil serait insuffisant à caractériser l'état physiologique du point excité.

En effet, d'autres facteurs primordiaux doivent être pris en considération. Si l'on recherche pour la fermeture du courant continu le seuil de l'excitation sur les muscles de l'homme (c'est-à-dire l'intensité la plus faible qui permette d'obtenir une contraction musculaire) en faisant à la main des temps de passage allant de $1/10^{\circ}$ de seconde au moins, jusqu'à des durées de plusieurs secondes, l'intensité pour laquelle on obtient ce seuil (intensité liminaire) se montre complètement indépendante de la durée pendant laquelle le courant a passé. Mais si, au moyen d'instruments variés, on fait des passages de courant extrêmement courts (de l'ordre de $1/10000^{\circ}$ de seconde) on constate qu'*au dessous d'une certaine durée limite*, l'intensité liminaire augmente : il faut augmenter l'intensité du courant pour obtenir le seuil. Ce fait a été constaté par tous les auteurs, et ils sont nombreux, qui se sont occupés de la question, (Engelmann, Fick, Brücke, Dubois, Cybulski et Zanietowski, Waller, Keith Lucas, Weiss, Cluzet, Lapique, etc.). Il existe donc une *durée* au-dessus de laquelle la durée du passage est indifférente, au-dessous de laquelle, la durée du passage importe. Or, lorsque Lapique eut fortement démontré, que cette durée limite, d'une part est constante pour un même tissu (muscle ou nerf), dans des conditions expérimentales variables (résistance, densité aux électrodes, conditions qui peuvent faire varier la hauteur des seuils dans des proportions aussi grandes qu'on le voudra); et que d'autre part elle varie considérablement d'un muscle à l'autre, il devint évident sans faire encore d'hypothèse sur la signification biologique de cette durée, que l'excitabilité d'un tissu ne pouvait être caractérisée d'une façon complète que par des paramètres contenant une mesure de durée.

Cependant, par des recherches de physiologie expérimentale, M. et L. Lapicque ont montré que cette durée, constante pour un tissu à l'état physiologique, varie d'une façon systématique chaque fois que l'état physiologique du tissu varie; (modifications de température, intoxications diverses : cocaïne, strychnine, digitale, etc.). D'autre part, par de belles recherches de physiologie comparée, étudiant dans la série animale, comment varie cette durée sur les différents muscles et nerfs des vertébrés et des invertébrés, ils ont montré dans une œuvre synthétique saisissante, que cette durée est liée d'une façon directe et étroite aux différentes propriétés physiologiques du tissu : durée de la contraction musculaire, vitesse de l'influx nerveux, pouvoir de sommation, nombre d'excitations nécessaires pour mettre le tissu en tétanos, etc., si bien que cette durée est en somme une constante qui exprime à elle seule la plupart des propriétés physiologiques du tissu considéré.

Devant de tels résultats, la nécessité, d'utiliser cette notion nouvelle, chaque fois que l'on veut caractériser d'une façon complète et objective les propriétés physiologiques d'un muscle ou d'un nerf, cette nécessité apparaît d'une façon tout à fait impérieuse.

*
**

Cette thèse comprendra donc trois parties.

Une première partie où seront exposées les recherches qui ont montré combien les différents tissus excitables sont différents au point de vue de l'influence de la durée du passage du courant sur leur excitation; et quels sont les différents procédés qui permettent d'apprécier cette caractéristique chronologique propre à chaque tissu.

Une deuxième partie, où sera étudiée en détail une méthode permettant d'apprécier la caractéristique chronologique de l'excitation par l'étude de l'efficacité relative des ondes induites de fermeture et d'ouverture de la bobine d'induction.

Une troisième partie où seront exposés les résultats qu'a donnés l'application de cette méthode à l'homme, dans l'état normal et dans différents états pathologiques.

En aucun chapitre de ma thèse je n'ai fait de la bibliographie pour de la bibliographie; sur maintes questions, importantes en elles-mêmes (historique de la loi d'excitation, étude des courants progressifs, addition latente, nature et modalités de l'influx nerveux, dégénérescences) mais qui n'interviennent qu'incidemment dans ma thèse, il eut été facile de donner une bibliographie complète; je ne l'ai pas fait, estimant que, parmi les mémoires que j'ai lus, je ne devais citer que ceux à qui j'empruntais soit un fait expérimental, soit un chaînon de raisonnement.

Ces différentes questions seront exposées avec la plus grande simplicité possible, avec le souci de revenir aux éléments toutes les fois que cela sera utile, de façon que toutes les parties soient accessibles à ceux même qui n'auraient pas une instruction mathématique ou physique approfondie. Je sais par de nombreuses conversations que beaucoup d'électrothérapeutes s'effraient de la délicatesse et de la minutieuse précision des méthodes employées à l'heure actuelle par les électrophysiologistes; mais il est certain que ces méthodes sont plus faciles à comprendre et moins délicates à appliquer, que nombre de méthodes journellement appliquées dans les hôpitaux (telle la méthode de Wassermann pour le diagnostic de la syphilis par exemple); il ne fait donc de doute pour personne que dans un avenir rapproché ces méthodes ne soient appelées à constituer la base même de l'électrodiagnostic et de l'électrothérapie, et que la pathologie ne soit appelée ainsi à bref délai à profiter des lumières nouvelles que l'électrophysiologie récente apporte à la connaissance des nerfs et des muscles.

PREMIÈRE PARTIE

La Loi d'Excitation et la Notion de Vitesse d'Excitabilité

CHAPITRE I

LA LOI D'EXCITATION

L'importance de la durée du passage du courant pour la production de l'excitation, a été longtemps méconnue par les électrophysiologistes; Du Bois Reymond observait qu'il ne pouvait rendre inefficace un courant efficace en diminuant la durée de son passage; il observait aussi que des courants qui atteignent finalement la même intensité sont d'efficacité inégale suivant la rapidité avec laquelle cette intensité est atteinte; aussi pensait-il que ce qui importait pour l'excitation, ce n'était ni la durée du passage, ni l'intensité atteinte, mais bien la variation d'intensité dans l'unité de temps.

Mais différentes recherches expérimentales ou théoriques ont montré que ces faits étaient, le premier insuffisamment observé, le second, interprété d'une façon inexacte; à la suite de nombreux travaux de Pflüger, von Bezold, Fick, Brücke, Engelmann, Hoorweg, Weiss, Lapique, la conception de Du Bois Reymond a été abandonnée, et aujourd'hui l'importance de la durée du courant est universellement reconnue. Nous ne pouvons faire l'historique de cette question. (1) Il nous suffira d'exposer ici la loi d'excitation actuellement admise, car elle représente l'aboutissant essentiel de toute cette série de travaux. On a coutume de désigner

(1) L'exposé le plus clair et le plus complet, à notre connaissance de cet ensemble de travaux, est celui qui a été fait par *Cremer*, in *Nägel's. Handbuch der Physiologie*. — Les lecteurs que cette instructive bibliographie intéresse pourront s'y reporter.

sous le nom de *loi d'excitation la loi qui relie l'intensité nécessaire pour produire le seuil de l'excitation* (intensité liminaire), à la durée de passage du courant.

Pour l'étudier il faut disposer de courants de durée variable, bien définie, et très courte; car, sur le gastrocnémien de la grenouille par exemple il faut descendre à des durées plus petites que $1/200^{\circ}$ de seconde environ pour constater une influence de la durée, et c'est pour n'avoir pu atteindre cette limite que Du Bois Reymond, opérant sur ce tissu, n'a pu constater aucune variation de l'intensité liminaire en fonction de la durée.

On peut réaliser des ondes de durée brève, par deux procédés principaux : les décharges de condensateur, et les méthodes rhéotomiques.

I. Etude de la loi d'Excitation par les décharges de condensateurs

Un condensateur, est essentiellement formé par deux armatures métalliques, conductrices, séparées par un isolant (diélectrique). Il est caractérisé au point de vue électrique par sa *capacité*, qui s'exprime en farads; un condensateur d'une capacité C , peut être chargé à des potentiels V , V' , V'' , etc., de même qu'un vase cylindrique de section s peut être rempli de liquide à des hauteurs h , h' , h'' .

Lorsqu'un condensateur de capacité C est chargé à un potentiel V , la quantité d'électricité qui s'y trouve déposée est :

$$Q = C V \quad (I). —$$

Si l'on décharge le condensateur à travers un circuit quelconque, la quantité d'électricité mise en jeu par la décharge sera cette même quantité $Q = CV$. — L'énergie libérée par cette décharge sera donnée par la formule :

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad (II). —$$

Au moment où le condensateur de capacité C, chargé à un potentiel V. se décharge dans un circuit de résistance R. sans self, l'intensité y prend instantanément une valeur :

$$I_0 = \frac{V}{R}$$

Mais à mesure que la quantité d'électricité disponible dans le condensateur s'écoule, et par conséquent que son potentiel diminue, l'intensité dans le circuit de décharge diminue; au bout d'un temps t, l'intensité I_t n'est plus qu'une certaine fraction de l'intensité initiale I_0 ; I_t et I_0 sont liées par la relation :

$$I_t = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{III}) \quad \text{où } e = 2,71828$$

On voit que cette formule permet de connaître à chaque instant la forme de la décharge du condensateur.

En effet, on peut calculer que l'intensité dans le circuit de décharge est tombée au $\frac{1}{n}$ de sa valeur initiale, lorsque

$$e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{1}{n}$$

c'est-à-dire lorsque

$$e^{\frac{t}{RC}} = n$$

ou, en prenant les logarithmes, lorsque

$$\frac{t}{RC} \log e = \log n$$

ou encore en résolvant par rapport à t, lorsque

$$t = RC \frac{\log n}{\log e}$$

On voit que le temps au bout duquel l'intensité tombe au $\frac{1}{n}$ de sa valeur initiale, dépend du produit RC. (constante de temps de la décharge). Si l'on utilise donc un circuit de résistance constante, on peut faire varier la durée du passage en utilisant des capacités différentes.

Je donne à titre d'exemple sur la *figure 1*, les courbes de décharge des capacités 1. 2. 5. 10 microfarads, chargées au potentiel de 1 volt, et se déchargeant sur une résistance de 10.000 ohms. Sur la *figure 2*, j'ai représenté la forme de la décharge d'une même capacité (1 microfarad) sur une même résistance (10.000 ohms) suivant qu'elle a été chargée à des potentiels de 1. 2. 5 volts.

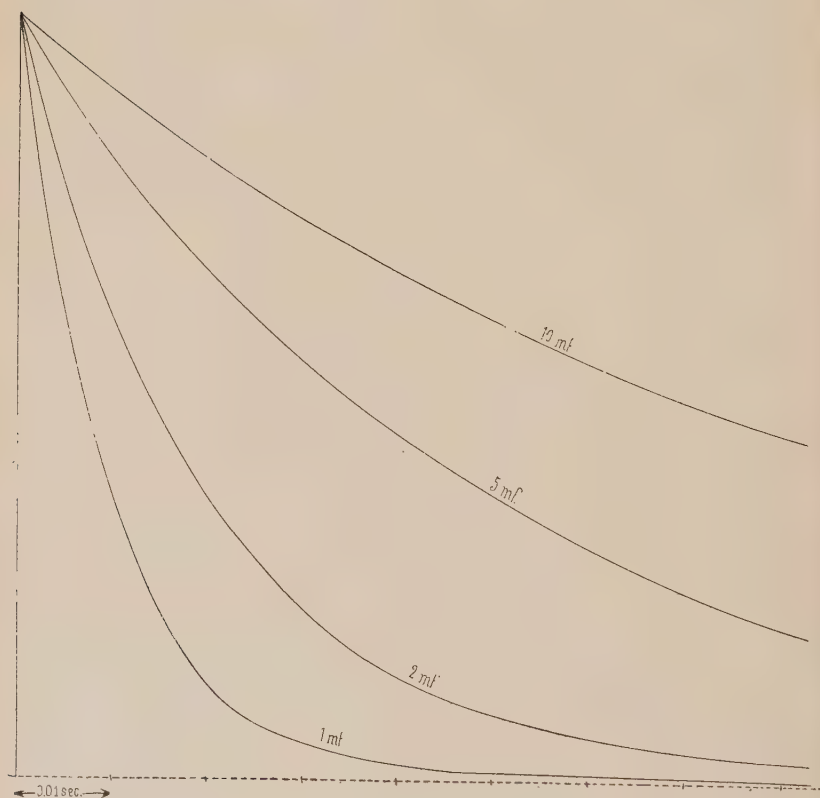


Fig. 1

En déchargeant des condensateurs de capacités différentes sur un circuit de résistance constante, on dispose donc d'ondes de durées différentes. — Si l'on recherche à quels voltages ces différentes capacités doivent être chargées pour que leur décharge produise le seuil de l'excitation, on observe, que, pour des capacités suffisamment grandes le voltage liminaire reste constant; et que au-dessous d'une certaine capacité le voltage liminaire augmente quand la capacité diminue.

Voici une expérience tirée d'un mémoire de l'expérimentateur qui a attaché son nom à la loi d'excitation par décharges de condensateurs, Hoorweg (1).



Fig. 2

(1) Hoorweg. Pf. Archiv., T. 37, p. 433 ; voir aussi Archives de Physiologie 1898.

Expérience faite sur l'homme; résistance du circuit de décharge 3.200 ohms; l'auteur détermine pour chaque capacité quel est le voltage liminaire.

Capacités en farads 10^{-6}	Voltages
0.5	4.5
0.1	7.
0.05	9.
0.02	16.
0.01	27.
0.008	33.
0.005	50.
0.004	60.

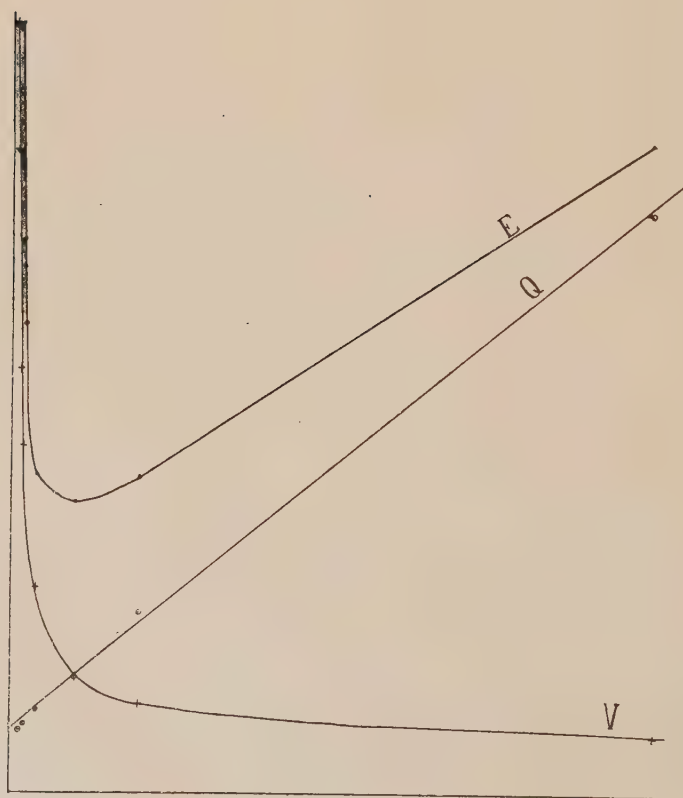


Fig. 3

Les chiffres ci-dessus sont traduits par le graphique (fig. 3); on voit que le voltage liminaire diminue quand la capacité augmente et que pour les très grandes capa-

cités, il tend vers une valeur limite minimum. Hoorweg a traduit les faits cités par la formule suivante qui relie le voltage liminaire à la constante de temps de la décharge du condensateur.

$$V = a R + \frac{b}{C} \quad (IV)$$

Chacune de ces décharges, équivalentes au point de vue de la production de l'excitation, met en jeu une quantité d'électricité et une quantité d'énergie différentes. — On peut calculer, pour chaque capacité quelle est la quantité d'électricité liminaire, la quantité d'énergie liminaire; il suffit d'appliquer les deux formules.

$$Q = CV$$

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

Les résultats sont les suivants (pour l'expérience ci-dessus).

CAPACITÉS	QUANTITÉS	ÉNERGIES
0.5	2.25	50.6
0.1	0.7	24.5
0.05	0.45	20.25
0.02	0.32	24.6
0.01	0.27	36.4
0.008	0.26	43.
0.005	0.25	62.5
0.004	0.24	72.

On voit (fig. 3), que la quantité d'électricité liminaire augmente avec la capacité, c'est-à-dire avec la durée du passage; en première approximation on peut admettre, que la loi de variation est une loi linéaire, que l'on exprime par la formule

$$CV = a RC + b.$$

$$Q = a RC + b. \quad (V)$$

formule obtenue en multipliant par C les deux termes de l'égalité IV.

Il apparaît également sur le graphique, que l'énergie nécessaire pour produire le seuil de l'excitation, varie avec la capacité employée et que pour une certaine capacité, l'énergie dépensée passe par un minimum très accusé.

L'Energie est liée à la constante de temps de la décharge par la formule.

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} C \left(a R + \frac{b}{C} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} C \left(a^2 R^2 + 2 \frac{a b R}{C} + \frac{b^2}{C^2} \right) \\ &= \frac{a^2 R^2 C}{2} + a b R + \frac{b^2}{2 C} \end{aligned}$$

On voit que l'Energie est une fonction du second degré, de la capacité utilisée; cette énergie passe par un minimum, pour la valeur de C qui annule sa dérivée soit

$$C = \pm \frac{b}{a R}$$

En résumé, lorsque la durée de la décharge augmente :

1°) l'intensité initiale nécessaire diminue, et atteint pour des durées convenables une valeur limite minimum.

2°) la quantité d'électricité liminaire augmente suivant une loi que l'on peut en première approximation considérer comme linéaire.

3°) L'énergie passe pour une certaine durée par une valeur minimum.

Des lois analogues peuvent être constatées en utilisant non plus les décharges de condensateur, mais les ondes rectangulaires.

II. Etude de la loi d'excitation au moyen des ondes rectangulaires

La réalisation d'ondes rectangulaires, de durée très brève et bien déterminée présente d'assez grosses difficultés. Fick avait construit un appareil assez grossier, dans lequel la durée du passage était déterminée par la durée du contact entre une lame métallique fixe et une pointe métallique glissant à sa surface, cette pointe métallique étant entraînée par un ressort; mais cet appareil qui avait permis à Fick de constater

sur des muscles lents (adducteur des valves de la moule) l'influence de la durée du passage sur la production de l'excitation, était trop grossier pour lui permettre d'établir la relation qui lie l'intensité liminaire à la durée du passage. Néanmoins la représentation graphique schématique qu'il donne du phénomène connu sous le nom de « lacune de Fick » contient une courbe de variation des intensités en fonction de la durée, qui peut déjà donner une idée approximative de la loi réelle.

Divers autres dispositifs avaient été employés; König en particulier avait utilisé un appareil à chute. Le dispositif incontestablement le plus précis, celui qui a permis de faire les mesures les plus exactes est celui qu'a employé Georges Weiss (1).

Le dispositif est celui représenté sur la fig. (4) : en S se trouve une source de potentiel; en D, un réducteur

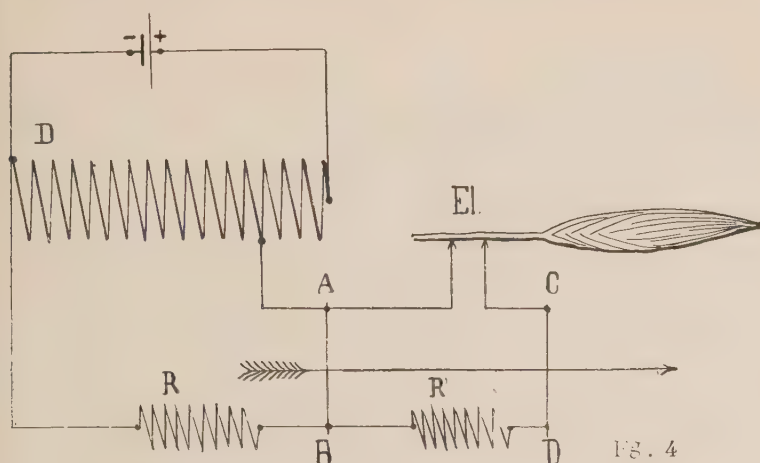


Fig. 4

de potentiel; en R et R' deux résistances très grandes, de l'ordre de 10^5 ohms; entre les points A et B se trouve un fil de résistance pratiquement nulle, de sorte que lorsque ce fil est placé il ne passe pratiquement aucun courant à travers les électrodes; si l'on vient à rompre

(1) G. Weiss Archives italiennes de biologie, t. 35.

ce fil, le courant passe dans la préparation; si l'on rompt ensuite le fil C D le circuit d'excitation est rompu, le courant passe donc dans la préparation pendant le temps qui sépare la rupture de AB et celle de CD. Si l'on fait couper les deux fils AB et CD par un mobile animé d'une grande vitesse, on pourra en variant la distance des deux fils, obtenir des courants de durée très courte, et très bien mesurée. En fait, G. Weiss, utilisait la balle lancée par une carabine à acide carbonique, et sur son dispositif un centimètre de distance des fils AB et CD, correspondait à une durée de 0'' 000077. On voit que ce dispositif permet de manier avec aisance des durées très courtes. Il va sans dire que pour de semblables durées le circuit doit être sans self, car le moindre retard à l'établissement du courant, prendrait sur ces ondes brèves une importance considérable et fausserait les résultats.

Avec ce dispositif, G. Weiss a étudié l'influence de la durée du passage du courant sur la production de l'excitation.

Voici les chiffres d'une expérience tirée du mémoire de cet auteur, chiffres qui indiquent pour chaque durée du passage, le voltage, la quantité et l'énergie nécessaires pour produire le seuil (1).

Expérience du 18 décembre 1900. — Rana esculenta. Distance approximative des électrodes 21 mm. Résistance approximative du circuit 590.000 ohms. Excitation descendante.

DURÉE DU PASSAGE (2)	VOLTAGE	ÉNERGIE	QUANTITÉ
6	147	1296	882
8	124	1230	992
10	110	1210	1100
12	94	1083	1134
16	81	1049	1304
20	73	1065	1460
30	62	1153	1860
40	57	1299	2286

(1) G. Weiss (loc. cit.) p. 22.

(2) Représentée par le nombre des centimètres qui sépare les deux fils que coupe la balle; pour avoir la durée réelle en secondes, il suffit de multiplier chacun des chiffres du tableau par 0,000077, temps que met la balle à franchir un centimètre.

On voit sur ces chiffres que lorsque la durée du passage croît :

1°) le voltage liminaire décroît et tend pour des durées de passage suffisantes vers une valeur limite minimum.

2°) L'énergie passe pour une certaine durée par une valeur minimum, c'est-à-dire qu'il existe une durée de passage pour laquelle on peut exciter un tissu en dépensant une quantité d'énergie minima.

3°) La quantité croît suivant une loi linéaire.

G. Weiss a traduit ces résultats dans la relation suivante : on est au seuil de l'excitation lorsque la quantité et la durée de la décharge sont reliées par la formule.

$$Q = a + bt$$

ou a et b sont des coefficients caractéristiques des propriétés du tissu, pour les conditions expérimentales où ils sont déterminés (température, distance des électrodes, résistance du circuit) le rapport de ces deux coefficients étant différent pour le gastronémien du crapaud et celui de la grenouille. Cette formule traduit en langage mathématique la loi suivante exprimée par Weiss. « Quand pour produire la réponse minima, on porte une excitation électrique sur un nerf ou un muscle, cette excitation doit mettre en jeu une quantité d'électricité constante plus une quantité proportionnelle à la durée de la décharge. Tout se passe comme s'il fallait pour exciter un nerf une quantité constante d'électricité, mais qu'il faille en plus, pendant toute l'opération combattre sans cesse un processus de retour à l'état premier, à l'aide d'une autre quantité d'électricité proportionnelle à la durée de l'action ».

De cette première relation se déduisent évidemment les formules suivantes qui relient l'intensité et l'énergie d'une onde liminaire à sa durée :

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{a + bt}{t} = \frac{a}{t} + b$$

$$\begin{aligned} E &= I^2 t = \left(\frac{a}{t} + b \right)^2 t \\ &= \frac{a^2}{t} + 2ab + b^2 t \end{aligned}$$

On voit sur cette dernière formule que E est une fonction de t, qui passe par une valeur minimum pour

$$t = \pm \frac{a}{b}$$

On voit l'étroite analogie qui relie les lois obtenues avec les décharges de condensateur, aux lois obtenues avec les ondes rectangulaires.

Mais ces lois, tant celles obtenues par Hoorweg avec les décharges de condensateur, que celles obtenues par George Weiss avec les ondes rectangulaires ne représentent qu'une première approximation de la loi expérimentale d'excitation. Elles ne traduisent les faits avec exactitude que pour une certaine échelle de durée assez limitée; aussitôt que l'on étudie, comme l'ont fait M. et L. Lapicque des durées suffisamment courtes, on observe des écarts systématiques.

Recherches de M. et L. Lapicque sur la forme de la loi d'excitation

Ces auteurs (2) ont montré que pour des durées très courtes, si l'on étudie des tissus lents, les chiffres expérimentaux obtenus pour les quantités se placent nettement au-dessous de la droite $Q = a + bt$, et dessinent une courbe très nette à concavité dirigée vers les abscisses positives.

(1) En faisant arbitrairement $R=1$.

(2) M. et L. Lapicque. Recherches sur la loi d'excitation électrique. Journal de Physiologie et de Pathologie générales. Septembre 1903.

Expérience (1) : Pince de *carcinus moenas*, mâle.

DURÉE	VOLTAGE LIMINAIRE	QUANTITÉ
0.0305 sec.	2.85	0.0869
0.0205	3.85	0.0789
0.0104	5.5	0.0572
0.0061	7.5	0.0457

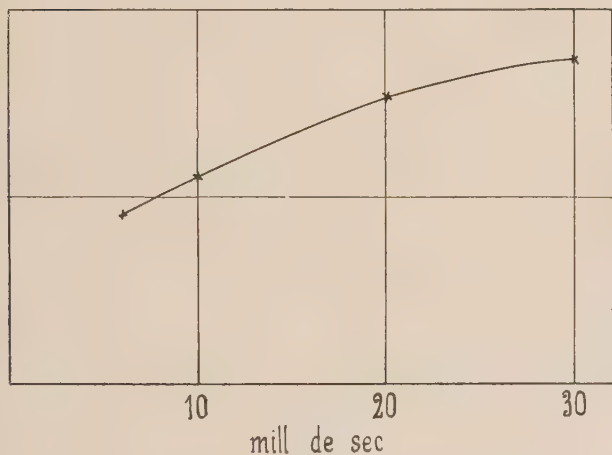


Fig. 5

Les résultats sont figurés sur le graphique (fig. 5). Ils ont été obtenus en utilisant comme rhéotome un appareil à chute. Voici un autre exemple :

Expérience effectuée sur le manteau de l'Aplysie. *Aplysia punctata*.

DURÉE	VOLTAGE LIMINAIRE	QUANTITÉ
0,048 sec.	3.6	0,172
0,157	2.8	0,439
0.223	2.6	0,579
0.54	2.5	1,330
0,80	2.25	1,800
1,37	1.95	2,67
2,07	1.87	3,87

(1) Ibid., page 852.

On voit que l'inflexion de la courbe des quantités vers les abscisses positives est très nette et très systématique (fig. 6).

Cette inflexion se retrouve avec une netteté extrême sur le gastrocnémien de la grenouille à la seule condition que l'on utilise des durées assez courtes.

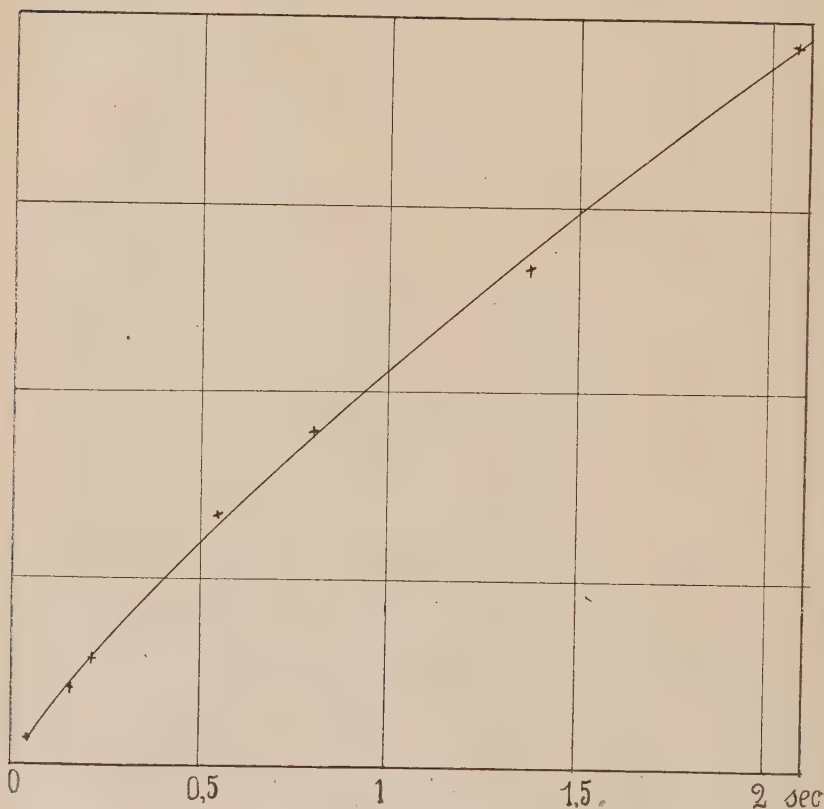


Fig. 6

Gildemeister et O. Weiss (1) en particulier qui ont retrouvé la relation de G. Weiss, en utilisant comme rhéotome le pendule de Helmholtz, ont constaté également cette inflexion pour les temps courts sur le gastrocnémien de la grenouille.

(1) *Gildemeister et O. Weiss. Über indirecte Muskelreizung durch Stromstöße und Strompausen : Pflügers Archiv. vol. CXXX.*

Cet écart systématique par rapport à la loi linéaire des quantités se retrouve encore si, au lieu d'utiliser les ondes rectangulaires, on utilise des décharges de condensateur.

Exemple (1). Gastrocnémien de *Bufo vulgaris*.

CAPACITÉS	VOLTAGES	QUANTITÉS
8	0.95	7,60
5	1.1	5,5
3	1.4	4,2
2	1.62	3,24
1	2.00	2,00

Le graphique (fig. 7), représente cette loi des quantités et montre clairement le phénomène.

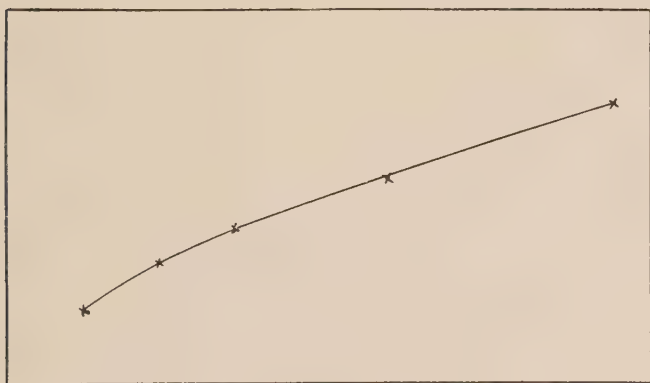


Fig. 7

Cette inflexion, qui est certaine, et que l'on observe sur tous les tissus à condition de considérer des durées convenables, présente une très grosse importance au point de vue surtout de la théorie de l'excitation électrique. Faire la théorie de l'excitation électrique, c'est trouver un phénomène physico-chimique pour la production duquel la quantité d'électricité et la durée de passage nécessaires, soient liées par la même relation

(1) *M. et L. Lapicque*. Recherches sur la loi d'excitation électrique. Journal de Physiologie et de Pathologie générale. Nov. 1903, page 1002.

expérimentale qui unit la quantité d'électricité nécessaire pour la production de l'excitation à la durée du passage. Entre les différents schémas physiques qui peuvent être donnés de l'excitation électrique, (polarisation de membranes, avec le phénomène de diffusion comme antagoniste; charge d'une capacité de polarisation avec fuite, etc.), la présence de cette inflexion permet de choisir (1).



(1) Voir à ce sujet : *L. Lapicque*. Recherches quantitatives sur l'excitation électrique des nerfs, traitée comme une polarisation (*Journal de Phys. et de Path.gén.* Juillet 1907) et : Sur la théorie de l'excitation électrique (*J. de Phys. et de Path. gén.*, juillet 1908).

CHAPITRE II

LA NOTION DE VITESSE D'EXCITABILITÉ

La durée de l'excitant intervient-elle sur tous les tissus de la même manière, pour mettre en jeu le processus d'excitation? Cette question n'a pu être étudiée avec précision et traitée quantitativement qu'après la découverte des lois d'excitation que nous avons précédemment énoncées.

Cependant, avant l'apparition de ces lois, un grand nombre de faits convergents pouvaient permettre d'affirmer avec certitude, que l'influence de la durée était différente sur l'excitabilité des différents tissus.

Les recherches de Fick (1) et d'Engelmann (2), d'abord, montraient, sans que le doute à cet égard fut possible, que l'excitabilité des tissus à contraction lente était nettement différente, au point de vue quantitatif, de l'excitabilité des tissus à contraction rapide. Alors que sur le classique gastrocnémien, musclé rapide, Du Bois Reymond n'avait pu déceler une influence de la durée même en descendant à des temps de passage de 0 sec. 005, Fick montrait sur le muscle adducteur des valves de la moule que, pour des durées de l'ordre du 1/10 de sec, cette influence se fait nettement sentir; et Engelmann sur l'uretère du lapin montrait qu'il n'était pas indifférent que le temps durât 1/4, 1/2 ou 1 seconde; à chacune de ces durées de fermeture correspondait une intensité liminaire différente.

(1) *Fick*. Beiträge zur vergleichenden Physiologie der irritablen Substanzen (1863).

Untersuchungen über Nerven Reizung (1864.)

(2) *Engelmann*. Beiträge zur allgemeinen Muskel und Nerven physiologie (Pflüger's Archiv. T. III).

D'ailleurs, ces deux auteurs ont immédiatement généralisé le phénomène qu'ils observaient sur ces tissus lents; ils ont pensé et vérifié que les différences qui séparaient l'excitabilité de ces tissus de celle du gastrocnémien, étaient purement quantitatives, et qu'on devait pouvoir observer sur ce dernier objet, les mêmes résultats à condition de considérer des durées suffisamment courtes. Fick a d'ailleurs longuement étudié l'influence de la durée du passage sur la quantité de travail produite par le muscle gastrocnémien et la représentation graphique qu'il donne du phénomène connu sous le nom de lacune de Fick, montre clairement que, pour chaque intensité, il y a une durée minima, au-dessous de laquelle le courant devient inefficace. Quant à Engelmann, il observa aussi, sans faire cependant de mesures quantitatives précises, que sur le gastrocnémien, pour chaque intensité un certain temps de fermeture est nécessaire pour la production de l'excitation, temps de fermeture qui est beaucoup plus court sur le gastrocnémien que sur les tissus lents. Il étudia aussi les variations de la durée suivant que l'on étudie le nerf, ou le muscle curarisé; suivant que le tissu est soumis à l'anémie, au refroidissement. Il concluait avec une extrême netteté que l'influence de la durée était très différente sur les différents tissus; que pour caractériser l'excitabilité d'un tissu il fallait faire intervenir un certain « temps physiologique » et il semble bien que Engelmann soit l'auteur, qui ait le mieux, avant l'apparition de la loi d'excitation, aperçu cette relation qui unit étroitement la plus ou moins grande rapidité de la mise en jeu de l'excitation, à la durée plus ou moins grande des différentes manifestations de l'activité des tissus (lenteur de la contraction, temps perdu, etc.).

Mais en fait, s'il admettait avec fermeté que d'une façon globale les valeurs de la durée nécessaire à la mise en jeu de l'excitation, sont plus grandes chez les tissus lents, plus faibles chez les tissus rapides, il ne définissait pas avec précision le « temps physiologi-

que », qui ne pouvait être soumis à une mesure quantitative exacte.

Nombreux sont d'ailleurs les auteurs, qui observèrent des différences dans la réaction des tissus à des ondes de durées différentes ou s'établissant avec une rapidité différente. Grützner et ses élèves Schott, Bürker ont étudié la question avec des appareils divers et ont établi quelques faits, sans aboutir toutefois à des conclusions générales.

Schott (1) montra que l'efficacité des ondes de fermeture et d'ouverture de la bobine d'induction était différente chez la grenouille et le crapaud (voir plus loin). Produisant au moyen de la Reizsiren des ondes rapides et des ondes lentes, il établit que le gastrocnémien du crapaud réagit mieux aux ondes lentes, et que le gastrocnémien de la grenouille réagit mieux aux ondes rapides.

Bürker (2) a observé des faits analogues sur les nerfs moteurs de la grenouille et du crapaud; mais il a étudié un certain nombre d'autres objets; il a excité les nerfs sécrétoires dans la patte d'un jeune chat; il sectionnait le sciatique, et excitant le bout périphérique au moyen d'ondes plus ou moins brèves, il constata la prépondérance d'efficacité des ondes brèves. Il ne constata pas de différences entre l'efficacité relative des ondes rapides et des ondes lentes sur le pneumogastrique de la grenouille et sur celui du crapaud; tous deux se montrèrent plus sensibles aux ondes brèves.

D'autre part on avait montré que sur un même tissu, suivant les conditions où il se trouve placé, l'efficacité relative des excitations brèves et des excitations

(1) *Schott*. Ein Beitrag zur elektrischen Reizung des quergestreiften Muskels von seinem Nerven aus (*Pflügers Archiv.*, t. 48, 1891, p. 354).

(2) *Bürker*. Über die Erzeugung und physiologische Wirkung schnell und langsam verlaufender magnetelektrischer Ströme (Thèse Tübingen, 1847).

longues varie. Brücke (1) a vu que le muscle excité directement (après intoxication curarique) présente une excitabilité très différente de son excitabilité indirecte, par le nerf; il est plus sensible aux ondes de longue durée, moins sensible aux ondes brèves. Gotch et Mac Donald (2) ont montré que, sous l'influence d'une élévation de température, le seuil s'élève pour les excitations longues et s'abaisse pour les excitations brèves.

Tous les faits que nous venons de rapporter montrent bien que l'influence de la durée du passage est différente sur les différents tissus, et sur un même tissu suivant son état physiologique. Les premières tentatives pour apprécier quantitativement cette influence de la durée, ont été effectuées par Waller (3)

Il a utilisé le fait signalé déjà par Hoorweg, à savoir que, dans l'excitation par décharges de condensateur, il y a une certaine forme de décharge qui produit le seuil de l'excitation en mettant en jeu une quantité d'énergie minima.

Waller, pense que le facteur important au point de vue de la production de l'excitation électrique, ce n'est ni la quantité d'électricité, ni l'intensité, mais bien l'énergie dépensée, et il pense que la forme de la décharge qui est liminaire avec le minimum d'énergie, doit être caractéristique de l'excitabilité, ou plutôt, selon son expression, de la mobilité du tissu considéré; il applique au nerf une comparaison qui fait image : lorsqu'un bateau roule, il y a une certaine longueur de vague, et une certaine hauteur de vague qui lui impriment un mouvement d'une amplitude maxima; à ce moment le mouvement de la vague est accordé avec le mouvement du bateau, et la période de la vague peut nous renseigner sur la période propre du bateau; aussi

(1) *Brücke*. Sitzungsberichte der Akad. d. Wiss. 58, 1868.

(2) *Gotch et Mac Donald*. Journal of Physiology., 1896, vol. XX, p. 247.

(3) *Waller*. The characteristic of nerve. Proceedings. Roy. Soc., 65, p. 207.

l'on peut attendre que les caractéristiques de la courbe de décharge optima nous renseignent sur la période propre du tissu vivant étudié, et soient une « caractéristique du tissu ».

Il cherche donc de diverses manières quelle est la décharge optima; soit en prenant une série de capacités et cherchant quels sont les voltages liminaires correspondants, soit en prenant une série de voltages, et cherchant quelles sont les capacités liminaires correspondantes, soit en prenant des combinaisons de voltages et de capacités qui libèrent la même quantité d'énergie avec des rapidités différentes, et recherchant quelle est la combinaison qui produit la contraction maxima.

Si le minimum d'énergie se produit pour une capacité C, chargée à un voltage V, se déchargeant sur une résistance R, Waller considère comme caractéristique du tissu la constante de vitesse de la décharge :

$$\frac{V}{CR} \propto a$$

V était exprimé en volts, C en microfarads, R en ohms, et a étant une constante égale à 0,8687.

Si par exemple sur un tissu, l'excitation a été obtenue avec une dépense d'énergie minima, pour une capacité de 0,01 mf, et un voltage de 0,2 volt, se déchargeant sur une résistance de 100.000 ohms, la caractéristique du tissu sera :

$$\frac{0,2}{10^{-8} \times 10^5} \cdot 0,8687 = 0,2 \times 10^3 \times 0,8687 = 173,74$$

On voit que cette expression tient compte non seulement de la durée de la décharge (mesurée par exemple, comme l'a fait Waller, par le temps au bout duquel l'intensité est tombée au 1/4 de sa valeur initiale) mais encore de la hauteur du seuil pour cette décharge. En somme, ce qui, d'après A. Waller, est caractéristique du tissu, c'est la rapidité de chute du potentiel pour la décharge optima.

Avec cette méthode l'auteur a étudié le sciatique de la grenouille, le sciatique du chat, et différents nerfs

de l'homme. Il a constaté que cette valeur caractéristique était plus petite chez la grenouille que chez les mammifères, c'est-à-dire que la pente de la décharge optima était moins abrupte chez la grenouille que chez les mammifères; (valeurs de $\frac{V}{C_R} \times 0,8687$ pour le sciatique de la grenouille : 217; 279; 364 etc.; pour les nerfs de l'homme 39500; 48250).

Mais, étudiant ensuite l'influence sur la caractéristique du nerf des modifications de température, il trouva que si l'on porte le sciatique de grenouille à 30°, sa caractéristique prend une valeur qui est tout-à-fait du même ordre que celle des nerfs des mammifères; ainsi la question de savoir s'il y avait une caractéristique pour chaque tissu restait incertaine, les différences observées entre les différents tissus examinés par Waller pouvant fort bien être rattachées à de simples différences de température.

Les recherches fondamentales sur cette question sont celles effectuées par M. et L. Lapique (1903 et suivants) en France et par Keith Lucas (1905 et suivants) en Angleterre.

Keith Lucas (1), reprit d'abord la question au point où l'avait laissée Waller, il essaya de caractériser les muscles par la vitesse de décharge de l'onde qui est liminaire en libérant le minimum d'énergie, et il établit que, pour chaque muscle, existait une excitation de durée optima, les différences observées entre les divers muscles, ne pouvant d'ailleurs être ramenées, comme on eut pu le penser après les recherches de Waller, à de simples différences de température. Il signala des différences nettes à ce sujet entre les muscles du crapaud et ceux de la grenouille. Cette méthode, lui

(1) *Keith Lucas*. Optimal electric stimuli. J. of Physiology., 34, p. 372.

Optimal electric stimuli. J. of Physiology., 35, p. 103.

The analysis of complex excitable tissues by their response to electric currents of short durations. J. of Phys. 35, p. 310.

Excitable substances of muscle. J. of Physiol. 36, 1907, p. 113 et J. of Physiol. 1907, p. 340, 1908, p. 458.

permet même de déceler sur certains muscles (sartorius) des courbes de variation d'énergie, en fonction de la durée du passage, présentant deux minima nets; et l'auteur en a conclu à la présence de plusieurs espèces de substances excitables, de rapidités différentes dont il put analyser séparément l'excitabilité.

Mais K. Lucas étudia l'influence du temps sur l'excitation des différents tissus, au moyen d'une autre méthode; il pensait, au début de ses recherches, que l'augmentation de l'intensité liminaire pour les durées de passage courtes devait tenir à une interférence des deux actions opposées que produisent dans le tissu la fermeture et l'ouverture du courant; dans cette hypothèse, les deux actions ne peuvent interférer que si l'ouverture se produit à un moment où le processus d'excitation de fermeture n'a pas encore atteint sa valeur définitive; de sorte que la durée pour laquelle le voltage liminaire augmente, renseignerait sur la durée du processus d'excitation lui-même. Cette interprétation des faits ne peut certes être soutenue, et Keith Lucas l'a lui-même abandonnée; mais elle l'a conduit à étudier sur différents tissus et dans diverses conditions la durée au-dessous de laquelle l'intensité liminaire s'élève, et à considérer cette durée comme caractéristique de la vitesse d'excitabilité du tissu; il a pu par cette méthode analyser, dans un seul et même muscle, différentes substances excitables et trouver indépendamment de Lapicque des différences dans la réaction des tissus à la durée de passage du courant analogues à celles que cet auteur avait signalées quelques années auparavant sur différents muscles de vertébrés et d'invertébrés (voir ci-dessous).

Ultérieurement K. Lucas, a proposé de caractériser l'excitabilité par des paramètres d'une formule de Hill, formule basée sur une conception purement physique du phénomène d'excitation.

En 1903, M. et L. Lapicque (1) étudiant systématiquement la loi d'excitation sur divers muscles très différents au point de vue de la durée de leur contraction, ou sur les nerfs qui les commandent, constatèrent que les lois obtenues sur ces différents objets, qualitativement analogues, étaient extrêmement différentes au point de vue de la valeur absolue des durées à considérer.

Ils montrèrent que pour obtenir une élévation de l'intensité liminaire, par diminution de la durée de passage, il fallait descendre à des durées extrêmement différentes suivant les tissus : voici par exemple pour quelles durées l'intensité liminaire commence à s'élever sur divers muscles :

Gastrocnémien de <i>Rana esculenta</i>	0 sec. 003
id. fusca	0 sec. 007
id. Bufo vulgaris	0 sec. 009
Droit de l'abdomen chez <i>Rana esculenta</i>	0 sec. 013
Muscles longitudinaux du pied de <i>Hélix pomatia</i>	0 sec. 048
Muscle ventriculaire de <i>Testudo græca</i>	0 sec. 082
Muscle adducteur de la pince, <i>Carcinus mœnas</i>	0 sec. 300
Muscles longitudinaux du manteau, <i>Aplysia punctata</i>	0 sec. 800

On voit qu'il y a là une échelle de durées extrêmement étendue, puisqu'elle s'étend de 3 à 800 millièmes de secondes.

M. et L. Lapicque ont montré que cette durée a une valeur tout à fait constante sur un même tissu, chez différents individus d'une même espèce, et que cette durée est dans une très large mesure indépendante des conditions expérimentales où on la détermine (densité aux électrodes, résistance du circuit), de sorte qu'elle

(1) M. et L. Lapicque.

C. R. Soc. Biol., 7 mars 1903, 4 avril 1903, 18 mars 1905, 26 mai 1906, 9 juin 1906, 12 janvier 1907, 13 avril 1907, 28 décembre 1907, 26 décembre 1908, 24 juillet 1909, 22 octobre 1910.

C. R. Ac. Sc., 20 mars 1905.

Journal de Physiologie et de Pathologie générale, septembre et novembre 1904.

Bulletin de la Société biologique d'Arcachon, 8^e année.

est une caractéristique très objective du tissu considéré. En outre, si l'on classe les tissus d'après ces durées caractéristiques, on trouve que l'ordre est le même que l'ordre des durées de contraction. L'intérêt qui s'attache à cette relation est évident; elle montre l'accord physiologique délicat qui unit les propriétés excitabilité et contractilité d'un même tissu; le temps intervient suivant la même loi pour mettre en jeu l'excitabilité des différents tissus, mais les durées absolues à considérer sont d'autant plus grandes (vitesse d'excitabilité plus faible) que la contraction du tissu dure elle-même plus longtemps.

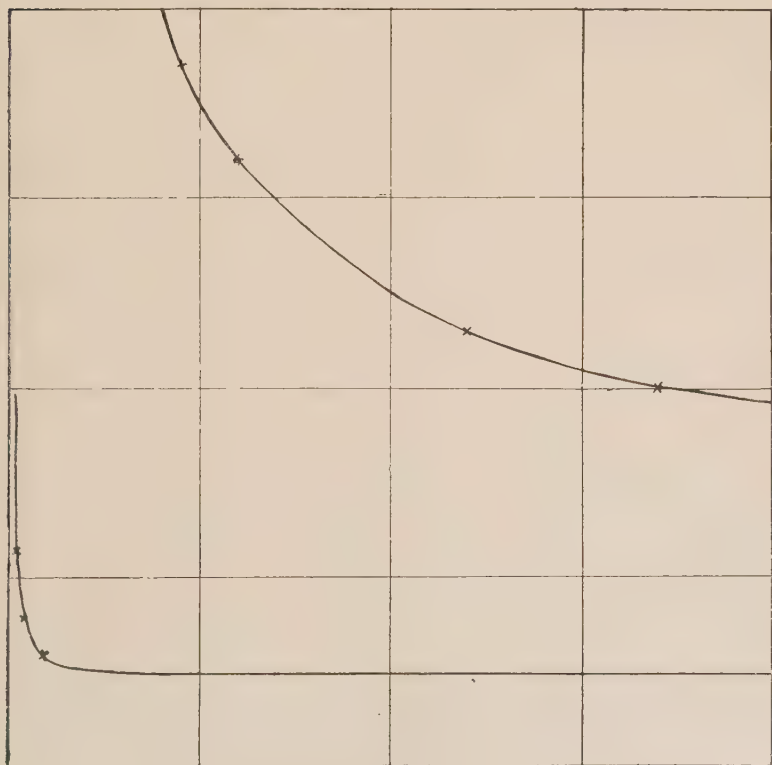


Fig. 8

Voici comme exemple deux lois obtenues par les auteurs sur le gastrocnémien de *Rana esculenta* et sur le pied d'*Helix pomatia*.

1°) Gastrocnémien de *Rana esculenta*. $T^{\circ} = 14^{\circ}$.

DURÉE DE PASSAGE	VOLTAGE LIMINAIRE	QUANTITÉS (si $R=1$) en coulombs $\times 10^{-6}$
0 sec. 0004	1.15	460
0 sec. 0008	0.80	640
0 sec. 0018	0.60	1080
∞	0.50	"

2°) *Helix pomatia*. $T^{\circ} = 16^{\circ}$.

DURÉE DE PASSAGE	VOLTAGE LIMINAIRE	QUANTITÉS (si $R=1$) en coulombs 10^{-4}
0 sec. 034	2	680
0 sec. 024	2.3	552
0 sec. 012	3.2	386
0 sec. 0094	3.7	347

Dans les deux cas la loi des quantités liminaires s'exprime en première approximation par la formule :

$$Q = a + bt$$

mais les coefficients a et b ont ici une valeur différente suivant qu'il s'agit du pied de l'escargot ou du gastrocnémien de la grenouille.

Pour le gastrocnémien de la grenouille, si nous calculons a et b pour les deux valeurs de la durée 0,0004 et 0,0018, nous trouvons les valeurs :

$$a = 284 \times 10^{-6}$$

$$b = 44 \times 10^{-2}$$

Pour *Helix pomatia*, si nous calculons a et b pour les deux valeurs de t : 0 sec. 012 et 0,034 nous trouvons :

$$a = 226 \times 10^{-4}$$

$$b = 1.34$$

Pour apercevoir comment les différences chronologiques dans l'excitabilité des différents tissus, se traduisent dans leur loi d'excitation, il faut considérer la signification de ces deux coefficients a et b et de leur quotient.

Tout d'abord : de la formule $Q = a + bt$, il résulte que a est la quantité d'électricité théoriquement nécessaire pour produire le seuil de l'excitation dans le cas

où le courant durerait un temps égal à 0; car lorsque $t=0$, la formule donne $Q=a$. De la formule

$$I = \frac{a}{t} + b$$

il résulte que b est l'intensité liminaire pour un courant de durée très grande; en effet pour t très grand, $\frac{a}{t}$ tend vers zéro, et $I=b$.

a est donc une quantité; b , une intensité; $\frac{a}{b}$ le quotient d'une quantité par une intensité est une durée, que signifie cette durée?

Il est facile de voir que cette durée conditionne la grandeur des temps à considérer dans l'excitation de chaque tissu, et que si l'on considère des tissus qui ont respectivement pour loi d'excitation les lois

$$Q = a + bt$$

$$Q' = a' + b't$$

$$Q'' = a'' + b''t \quad \text{etc...}$$

les durées au-dessous desquelles il faudra descendre pour constater une élévation de l'intensité liminaire, seront entre elles comme $\frac{a}{b}$, $\frac{a'}{b'}$, $\frac{a''}{b''}$.

En effet : Soit un tissu dont la loi d'excitation est

$$Q = a + bt$$

ou encore :

$$I = \frac{a}{t} + b$$

Nous savons que pour des courants de longue durée, l'intensité liminaire est b ; cherchons à quelles durées il faut descendre pour que l'intensité liminaire s'élève d'une certaine fraction $\frac{b}{n}$ par exemple; l'intensité liminaire sera $b + \frac{b}{n}$ pour un temps t tel que :

$$b + \frac{b}{n} = \frac{a}{t} + b$$

$$\frac{b}{n} = \frac{a}{t}$$

$$t = n \frac{a}{b}$$

La valeur de ce rapport $\frac{a}{b}$ des deux coefficients de la loi d'excitation conditionne directement cette durée limite au-dessous de laquelle le voltage liminaire augmente; elle est pour ainsi dire l'unité des temps à considérer pour l'excitation de chaque tissu; ce rapport peut être pris comme mesure de cette durée limite que nous avons montrée être une caractéristique physiologique importante des tissus excitables.

M. Lapicque a proposé de mettre cette durée $\frac{a}{b}$ en évidence dans la formule même de la loi d'excitation; si l'on remplace $\frac{a}{b}$ par la lettre τ , la formule

$$I = \frac{a}{t} + b$$

devient, en mettant dans le second membre b en facteur :

$$\begin{aligned} I &= b \left(\frac{a}{bt} + 1 \right) \\ &= b \left(\frac{\tau}{t} + 1 \right) \end{aligned}$$

L'excitabilité du tissu se trouve alors définie par deux caractéristiques appelées par L. Lapicque (1) :

1°) b . *rhéobase* : intensité nécessaire pour produire le seuil, dans le cas d'un courant à début brusque indéfiniment prolongé.

2°) τ . *Chronaxie*, inverse de la vitesse d'excitabilité; elle peut être calculée d'après les formules qui représentent la loi d'excitation pour un tissu; mais elle représente expérimentalement la durée liminaire pour un courant d'intensité double de la rhéobase : en effet pour $I = 2b$, on a :

$$\begin{aligned} 2b &= b \left(\frac{\tau}{t} + 1 \right) \\ t &= \tau \end{aligned}$$

La chronaxie, caractéristique chronologique de l'excitation, traduit dans le domaine « excitabilité » les

(1) L. Lapicque. Définition expérimentale de l'excitabilité. C. R. Soc. Biol., 24 juillet 1909.

phénomènes de rapidité ou de lenteur plus ou moins grande que l'on observe dans le domaine de la contractilité (1). En particulier elle classe les muscles dans le même ordre que les classe la durée de leur contraction.

Les chronaxies des différents tissus, ont des valeurs extrêmement différentes : sur les muscles les plus rapides (gastrocnémiens de grenouilles, muscles striés des vertébrés à sang chaud) la chronaxie est de l'ordre du $1/10.000$ de seconde; sur les muscles les plus lents (anneau de l'estomac) elle est de 1 seconde environ.

On voit comment, dans le cas des courants rectangulaires, cette chronaxie peut être mesurée; il suffit de déterminer quelle est la durée liminaire pour une intensité double de l'intensité rhéobasique.

Dans le cas où l'on emploie des décharges de condensateur, la résistance du circuit étant connue, on peut calculer la chronaxie en secondes, en recherchant quelle est la capacité liminaire pour une intensité double de celle qui est nécessaire pour les capacités très grandes (intensité rhéobasique), et en utilisant un coefficient de transformation que M. et L. Lapicque ont expérimentalement déterminé :

$$\tau = 0.37 RC ;$$

on obtient ainsi la chronaxie en secondes en exprimant R en ohms et C en farads.

Cette notion de vitesse d'excitabilité, extraite empiriquement de la comparaison des tissus excitable, s'est montrée un instrument d'analyse pénétrant, délicat et fidèle, se prêtant à une mesure très exacte. Il n'entre pas dans notre dessein d'analyser en détail les recherches auxquelles cette notion nouvelle a donné naissance. Nous rappellerons seulement quelques-uns des résultats obtenus par L. et M. Lapicque, Keith Lucas et leurs élèves, pour montrer combien d'une part toutes

(1) Remarquons que cette durée τ , qui est égale à la durée $\frac{a}{b}$, représente donc la durée de l'onde rectangulaire produisant le seuil de l'excitation en mettant à jeu la quantité d'énergie minima.

les propriétés fondamentales de la vie de relation des tissus peuvent être rattachées à la notion de vitesse d'excitabilité (1), et combien d'autre part, la chronaxie est un réactif objectif, pour la caractérisation des propriétés d'un tissu.

1°) Relation entre la vitesse d'excitabilité du tissu et sa sensibilité aux courants lentement croissants (2).

Les courants à établissement progressif sont moins efficaces que les courants à établissement brusque; on peut constater pour tous les tissus que lorsque la pente suivant laquelle s'établit le courant devient de moins en moins abrupte, l'intensité pour rester liminaire doit être augmentée; il arrive même que pour une certaine pente, tout courant, quelque intensité qu'il atteigne reste inefficace. On peut étudier ce phénomène quantitativement soit en étudiant pour chaque tissu quelle est cette pente limite qui permet encore de l'exciter, soit en mesurant pour chaque tissu le rapport des intensités qui sont liminaires pour deux courants dont l'un s'établit brusquement et l'autre s'établit progressivement (Diviseur de l'Excitation de von Kries). Or, on constate que la pente limite est d'autant plus faible que le tissu est à vitesse d'excitabilité plus faible; de même la diminution d'efficacité du courant graduellement croissant par rapport à un courant brusque, est d'autant plus faible que le tissu est à chronaxie plus grande.

C'est ainsi que pour le gastrocnémien du crapaud la pente limite est moins abrupte que pour le gastrocnémien de *Rana*; de même la différence d'efficacité des courants brusques et des courants progressifs est plus grande pour *Rana* que pour *Bufo*.

(1) Voir à ce sujet *L. Lapicque*. Principe pour une théorie du fonctionnement nerveux élémentaire. *Revue générale des Sciences*, 1910.

(2) *L. Lapicque*, C. R. Soc. Biol., 11 janvier 1908, 29 février et 4 avril 1908, *Keith Lucas*, J. of Physiology., 36, p. 253.

On voit que la sensibilité des différents tissus aux courants lentement croissants est une fonction de leur vitesse d'excitabilité. Cette relation se conserve naturellement si au lieu de prendre différents tissus, on fait agir, sur un seul tissu, différents agents qui modifient sa vitesse d'excitabilité; on constate que, au fur et à mesure de la variation de cette vitesse, la sensibilité du tissu aux courants lentement croissants varie parallèlement. Keith Lucas (1), par exemple, sur le sartorius de Rana, a pu constater sous l'influence du vieillissement dans les solutions calciques une augmentation considérable de la vitesse d'excitabilité; il a constaté parallèlement une diminution de plus en plus grande de l'efficacité des courants lentement croissants.

Kahn (2) a observé des résultats analogues, sous l'influence du Calcium.

2° Relation entre la vitesse d'excitabilité et l'addition latente.

Dans certaines conditions, deux excitations isolément inefficaces peuvent devenir efficaces lorsqu'elles se succèdent à court intervalle sur le tissu étudié; c'est le phénomène d'addition latente (3).

On peut essayer de soumettre à l'analyse quantitative les différentes modalités de cette propriété sur différents tissus en recherchant : a) soit le plus grand intervalle de temps pour lequel deux excitations, qui isolément sont de 5 % ou de 10 % sous liminaires, additionnent encore leurs effets et, produites successivement, deviennent efficaces. Il résulte des recherches de L. Lapique et Keith Lucas (4) que ce temps maximum, au-dessus duquel les excitations ne peuvent plus se sommer varie d'un tissu à l'autre, et varie pour un même tissu suivant l'état physiologique où il se

(1) K. Lucas. *Journal of Physiology*, 1908, page 458.

(2) Kahn. *Pflügers Archiv.*, 143, 1912.

(3) Voir Richet Ch. *Travaux du laboratoire de Marey*, 1877, T. III.

(4) L. Lapique. *C.R. Ac. Sc.*, 150, p. 796.

K. Lucas. *Journal of Physiology.*, 39, p. 461.

trouve; il varie dans le même sens que le « temps physiologique de l'excitation » mesuré soit par la durée pour laquelle un courant à début brusque atteint sa limite inférieure d'intensité efficace, soit par la pente limite, soit par la chronaxie. *b)* Soit comme l'a fait Lapique, la durée des excitations qui permet pour un intervalle d'excitations donné, une certaine sommation (c'est-à-dire une diminution pour 100 du voltage liminaire). On constate alors, que la valeur de l'addition latente augmente quand la durée des excitations devient plus courte et que pour obtenir une certaine valeur d'addition, il faut descendre à des durées d'excitation d'autant plus courtes que le temps physiologique du tissu est lui-même plus court, la chronaxie plus petite.

3° Relation entre la vitesse d'excitabilité et les propriétés de l'influx nerveux d'un nerf.

M. Lapique a montré (1) en utilisant surtout les derniers résultats obtenus par Carlson, que la vitesse de l'influx nerveux, la fréquence des ondes de négativité qui le constituent, et leur durée, varient avec la vitesse d'excitabilité de l'objet étudié.

En somme, on voit que l'on obtiendrait le même classement des muscles si l'on prenait comme réactif de classement, pour chaque muscle.

soit la rapidité de sa contraction.

soit le nombre d'excitations nécessaires pour mettre ce muscle en tétanos complet.

soit la vitesse de conduction de l'influx nerveux moteur.

soit la fréquence des ondes de négativité dont cet influx est constitué.

soit la rapidité de ces ondes de négativité.

soit l'inverse de la durée du passage au dessous de laquelle l'intensité, pour rester liminaire doit être augmentée.

soit la pente limite qui permet de l'exciter.

(1) *L. Lapique*. Revue générale des Sciences, février 1910.

soit la fréquence minima permettant, pour une excitation de durée donnée, une certaine sommation.

soit la durée maxima des excitations permettant, pour un intervalle d'excitations déterminé, une certaine sommation.

Ces faits font ressortir avec clarté, la relation chronologique délicate qui accorde les différentes propriétés d'un système neuro-musculaire dans les domaines de l'excitabilité, de la conductibilité et de la contractilité.

Il n'est malheureusement pas encore possible, dans l'état actuel de la science électrophysiologique, d'assigner à ces différences chronologiques fondamentales dans l'excitabilité des différents tissus, un support physico-chimique précis; il est probable que ce qui conditionne ces différences, ce sont des différences d'origine non définie encore, dans le mode de polarisation des tissus en fonction du temps; mais la preuve péremptoire en est encore à donner.

De toute façon, il est sûr, que, quelque soit le déterminisme de cette plus ou moins grande rapidité, la perturbation excitante se développe avec des rapidités différentes dans les divers tissus, sous l'influence du passage du courant; et cette rapidité conditionne toutes les différences dans les modalités de l'excitabilité des différents tissus.

On voit donc qu'en mesurant un des paramètres de la vitesse d'excitabilité (chronaxie par exemple, — ou pente limite, — ou faculté de sommation, etc.), on atteint une caractéristique profonde, pénétrante du tissu que l'on étudie, puisque les propriétés fondamentales de chaque tissu sont liées étroitement à cette vitesse même.

Si l'on remarque en outre que la simple hauteur des seuils, généralement utilisée pour définir l'excitabilité des tissus, est essentiellement contingente, relative à la densité du courant aux électrodes et à la forme des ondes excitantes (de sorte qu'il est illusoire de vouloir déterminer un seuil objectif), tandis que la vitesse d'ex-

citabilité se montre pratiquement indépendante des contingences expérimentales, on reconnaîtra que la détermination de cette caractéristique s'impose chaque fois que l'on veut analyser avec quelque pénétration, l'excitabilité d'un tissu.

DEUXIÈME PARTIE

Principe de la mesure de la vitesse
d'excitabilité au moyen du rapport des
quantités d'électricité liminaires pour
l'onde de fermeture et l'onde d'ouverture
de la bobine d'induction.

CHAPITRE I

THÉORIE DES INDICES DE VITESSE

Soit un tissu excitable, muscle ou nerf, caractérisé au point de vue de son excitabilité par les deux paramètres de sa loi d'excitation : A (rhéobase, seuil fondamental, pour un passage de courant de durée pratiquement infinie), et τ (chronaxie). Si nous recherchons quelles sont pour les durées de passage variables, les intensités liminaires, nous savons que ces intensités liminaires sont reliées aux durées correspondantes par la formule :

$$I = A \left(1 + \frac{\tau}{t} \right) \quad (I).$$

Chaque onde liminaire met en jeu une certaine quantité d'électricité : les quantités d'électricité liminaires sont reliées aux durées correspondantes par la formule suivante, obtenue en multipliant par t , les deux membres de l'équation (I).

$$I t = A t \left(1 + \frac{\tau}{t} \right)$$

qui s'écrit

$$Q = A t + A \tau$$

ou

$$Q = A (t + \tau) \quad (II).$$

Si nous considérons plus particulièrement deux ondes excitantes de durée t et nt , nous pouvons calculer quelles quantités d'électricité elles devront mettre en jeu pour atteindre le seuil :

L'onde de durée t , sera liminaire, à condition de mettre en jeu une quantité Q_t :

$$Q_t = A (t + \tau) \quad (III).$$

L'onde de durée nt sera liminaire à condition de mettre en jeu une quantité Q_{nt} :

$$Q_{nt} = A (nt + \tau) \quad (IV).$$

Si nous faisons le rapport de ces deux quantités liminaires pour les ondes de durée t et nt , nous obtenons la valeur :

$$\frac{Q_{nt}}{Q_t} = \frac{A (nt + \tau)}{A (t + \tau)}$$

ou encore
$$= \frac{nt + \tau}{t + \tau} \quad (V)$$

On voit que ce rapport, pour deux ondes données, est indépendant du seuil A , et est fonction de la vitesse d'excitabilité τ du tissu considéré.

Il apparaît donc que le rapport des quantités d'électricité liminaires pour deux ondes de durées différentes, est indépendante des contingences expérimentales qui font varier la hauteur de seuil, et peut être pris comme paramètre de la vitesse d'excitabilité du tissu considéré. — Nous l'appellerons indice de vitesse, et le désignerons par la lettre i .

On peut concevoir ce fait par de simples considérations géométriques; représentons graphiquement la ligne des quantités représentative de l'équation (fig. 9).

$$Q = A (t + \tau)$$

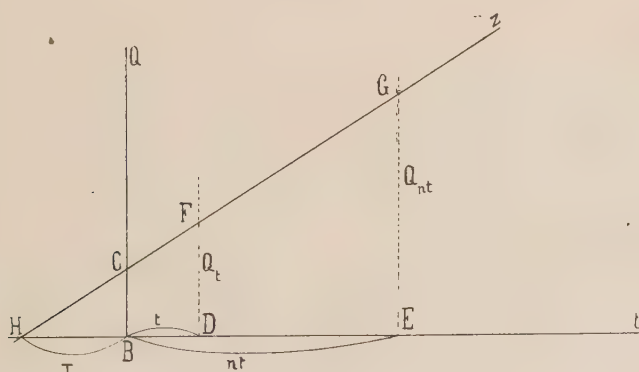


Fig. 9

Pour cela, portons en abscisse les temps, et en ordonnée les quantités; nous obtenons la droite bien connue HZ qui coupe en H l'axe des temps et en C l'axe des quantités. Il est facile de voir que, sur cette figure,

$HB = \tau$: en effet le point A est le point d'ordonnée nulle : donc son abscisse t est telle que

$$A(t + \tau) = 0$$

donc

$$At = -A\tau$$

$$t = -\tau$$

on voit donc que

$$HB = \tau$$

Considérons maintenant deux ondes de durée t et nt; représentons ces durées sur l'axe des abscisses : soit $BD = t$ et $BE = nt$; les quantités d'électricité nécessaires pour obtenir le seuil avec ces deux durées sont respectivement $DF = Q_t$ et $EG = Q_{nt}$. Or les deux triangles HDF et HEG sont semblables comme ayant leurs angles égaux chacun à chacun; on peut donc écrire :

$$\frac{EG}{DF} = \frac{HE}{HD}$$

ou encore

$$\frac{EG}{DF} = \frac{HB + BE}{HB + BD}$$

ou en remplaçant les longueurs DF, EG, HB, BD, BE par leurs valeurs :

$$\frac{Q_{nt}}{Q_t} = \frac{\tau + nt}{\tau + t}$$

Nous arrivons par cette voie à la même conclusion que précédemment. Le rapport des quantités d'électricité liminaires pour deux ondes de durées différentes peut être pris comme paramètre de la vitesse d'excitabilité.

Ceci est facile à concevoir puisque, d'après la formule que nous avons donnée plus haut

$$Q = A(t + \tau)$$

la quantité d'électricité pour rester liminaire, quand la durée de passage augmente, doit être augmentée d'autant plus vite que τ (chronaxie) est plus grand.

Il faut bien entendre que cet indice n'est pas *proportionnel* à la vitesse d'excitabilité du tissu; il est sim-

plement *fonction* de cette vitesse d'excitabilité; c'est dire que si l'on range différents tissus par ordre de vitesse d'excitabilité, on obtiendra le même ordre que si on les rangeait d'après leurs indices de vitesse respectifs.

Comment cet indice varie-t-il en fonction de la vitesse d'excitabilité? On peut s'en rendre grossièrement compte en faisant le raisonnement mathématique suivant :

Nous avons vu que (V)

$$i = \frac{Q_{nt}}{Q_t} = \frac{nt + \tau}{t + \tau}$$

Supposons une échelle théorique de vitesses d'excitabilité variant de 0 à $+\infty$; entre quelles limites varieront les indices correspondants?

pour $\tau = 0$ le rapport $\frac{Q_{nt}}{Q_t}$ prend la valeur $\frac{nt}{t} = n$

pour $\tau = +\infty$ le rapport $\frac{Q_{nt}}{Q_t}$ tend vers la valeur 1

On voit que pour une échelle de vitesses d'excitabilité allant de 0 à $+\infty$, l'échelle des indices correspondants varierait de la valeur n (rapport de durée des deux ondes) à la valeur 1. — Mais l'échelle réelle des valeurs de τ que l'on rencontre dans l'étude des nerfs et des muscles, étant une échelle finie, il faut faire un choix judicieux de la durée des ondes excitantes pour que l'indice traduise avec sensibilité les variations de τ .

Si, en effet, on utilise des ondes de durée très courte par rapport à τ , de sorte que t et nt , deviennent négligeables par rapport à τ la valeur de l'indice tend vers 1, et conserve une valeur voisine de 1, sensiblement indépendante de la valeur de τ .

Inversement si l'on utilise des ondes de durée très longue par rapport à τ de sorte que τ soit négligeable par rapport à t et nt , l'indice tend vers une valeur voisine de n , sensiblement indépendante de la valeur de τ .

On voit que ce qui importe pour la sensibilité avec laquelle l'indice traduit les variations de τ , c'est le rapport entre la durée des ondes excitantes et les valeurs de chronaxie à apprécier. On peut donc essayer de calculer, pour des ondes dont le rapport de durée est n , quelle doit être la valeur absolue de leur durée pour que l'indice déterminé traduise avec une sensibilité maxima la différence de vitesse entre deux tissus de chronaxie τ et τ' .

Soit θ et $n\theta$ les durées à déterminer

Pour le tissu de chronaxie τ , l'indice i a une valeur

$$i = \frac{n\theta + \tau}{\theta + \tau}$$

Pour le tissu de chronaxie τ' l'indice i' a une valeur

$$i' = \frac{n\theta + \tau'}{\theta + \tau'}$$

si τ est $> \tau'$, on a $i > i'$, et la différence des deux indices est

$$i - i' = \frac{n\theta + \tau}{\theta + \tau} - \frac{n\theta + \tau'}{\theta + \tau'}$$

La sensibilité de l'indice sera maxima pour la valeur de θ qui donne à cette expression une valeur maxima; quelle est cette valeur de θ ?

$$\begin{aligned} \text{on a } i - i' &= \frac{(n\theta + \tau)(\theta + \tau') - (n\theta + \tau')(\theta + \tau)}{(\theta + \tau)(\theta + \tau')} \\ &= \frac{\theta(n-1)(\tau' - \tau)}{\theta^2 + \theta(\tau + \tau') + \tau\tau'} \end{aligned}$$

Cette expression passe par un maximum pour la valeur de θ qui annule sa dérivée; si l'on pose :

$$u = \theta(n-1)(\tau' - \tau)$$

$$v = \theta^2 + \theta(\tau + \tau') + \tau\tau'$$

on a

$$i - i' = \frac{u}{v}$$

$$\text{et } \frac{d(i - i')}{d\theta} = \frac{vu' - uv'}{v^2}$$

$$= \frac{[\theta^2 + \theta(\tau + \tau') + \tau\tau'](n-1)(\tau' - \tau) - \theta(n-1)(\tau' - \tau)(2\theta + \tau + \tau')}{[\theta^2 + \theta(\tau + \tau') + \tau\tau']^2}$$

$$= \frac{-\theta^2(n-1)(\tau' - \tau) + \tau\tau'(n-1)(\tau' - \tau)}{[\theta^2 + \theta(\tau + \tau') + \tau\tau']^2}$$

Cette dérivée s'annule pour les valeurs de θ qui annulent son numérateur, soit

$$\theta \theta' = \frac{\pm \sqrt{+4(n-1)(\tau' - \tau)(\tau\tau')(n-1)(\tau' - \tau)}}{-2(n-1)(\tau' - \tau)}$$

$$= \pm \sqrt{\tau\tau'}$$

Si nous considérons seulement les valeurs positives de θ nous voyons que la dérivée s'annule pour $\theta = \sqrt{\tau\tau'}$.

En outre pour les valeurs comprises entre zéro et θ dérivée est positive tandis que pour les valeurs comprises entre θ et l'infini, la dérivée est négative : en effet, ce qui commande le signe de la dérivée, c'est le signe du numérateur, le dénominateur étant un carré; or, pour les valeurs de θ qui vont de 0 à $\sqrt{\tau\tau'}$ le numérateur est du signe contraire au coefficient de θ^2 à savoir $-(n-1)(\tau' - \tau)$ (or dans les hypothèses faites : $n > 1$ et $\tau' > \tau$, ce coefficient est négatif) entre 0 et $\sqrt{\tau\tau'}$ la dérivée est donc positive; entre $\sqrt{\tau\tau'}$ et $+\infty$ le numérateur est au contraire du signe du coefficient de θ^2 , à savoir négatif ;

Donc pour $\theta = +\sqrt{\tau\tau'}$ la fonction passe bien par un maximum. La sensibilité de la méthode est donc maxima lorsque la durée des ondes est $\theta = \sqrt{\tau\tau'}$

$$\text{et } n\theta = n\sqrt{\tau\tau'}$$

Si l'on recherche par exemple, quelle est la durée optima des ondes, pour des chronaxies de 0.01 et 0.0001, on trouve

$$\theta = \sqrt{0.01 \times 0.0001} = 0,001$$

Or, les chronaxies que l'on rencontre en réalité dans l'étude des différents tissus sont justement de l'ordre de 0.0001 à 0.01, et la durée de l'onde d'ouverture de la bobine d'induction est de l'ordre de grandeur 0.0001.

On voit que, par le fait du hasard, les ondes de la bobine d'induction se trouvent avoir des durées assez favorables, pour l'étude des échelles de vitesse d'excitabilité les plus fréquentes.

Nous donnons, à titre d'indication, un exemple numérique qui donne pour des ondes de durée définies l'échelle d'indices i , i' , i'' , i''' , correspondant aux chronaxies τ , τ' , τ'' , τ'''

Calculons pour deux ondes de durées 0 sec. 01 et 0 sec. 001, l'échelle des indices correspondant à une échelle de vitesses d'excitabilité de 0 sec. 0001, 0 sec. 001, 0 sec. 01, 0 sec. 1, 1 seconde.

Nous n'avons qu'à chercher quelles sont les différentes valeurs que prend i lorsque dans la formule

$$i = \frac{nt + \tau}{t + \tau}$$

on remplace nt par 0.01, t par 0.001, et successivement par les différentes valeurs indiquées :

$$\text{pour } \tau = 0.0001 \quad i = \frac{0.01 + 0.0001}{0.001 + 0.0001} = \frac{0.0101}{0.0011} = 9.18$$

$$\text{pour } \tau = 0.001 \quad i = \frac{0.01 + 0.001}{0.001 + 0.001} = \frac{0.011}{0.002} = 5.5$$

$$\text{pour } \tau = 0.01 \quad i = \frac{0.01 + 0.01}{0.001 + 0.01} = \frac{0.020}{0.011} = 1.81$$

$$\text{pour } \tau = 0.1 \quad i = \frac{0.01 + 0.1}{0.001 + 0.1} = \frac{0.11}{0.101} = 1.08$$

$$\text{pour } \tau = 1 \quad i = \frac{0.01 + 1}{0.001 + 1} = \frac{1.01}{1.001} = 1.009$$

Nous aurons à revenir sur ces résultats lorsque nous apprécierons la valeur de la méthode des indices de vitesse.

Les raisonnements ci-dessus sont rigoureux si l'on étudie des ondes rectangulaires, à l'approximation de

la loi $Q = A (t + \tau)$; ils ne sont plus qu'approchés si, au lieu d'utiliser des ondes rectangulaires, on utilise soit des décharges de condensateur, soit des chocs d'induction de durée variable ; — mais ils permettent de comprendre que l'on puisse mesurer des indices de vitesse en mesurant le rapport des quantités d'électricité liminaires, avec deux ondes d'induction de durées différentes. C'est cette méthode que nous devons maintenant étudier.

CHAPITRE II

LA BOBINE D'INDUCTION

Il ne nous est pas possible d'expliquer ici, dans leurs détails, les lois qui président aux phénomènes d'induction; cependant nous rappellerons deux notions principales qui nous paraissent indispensables pour la compréhension des phénomènes qui se passent dans le Chariot de Du Bois Reymond :

1° *Lorsqu'un fil se trouve parcouru par un courant électrique, l'espace environnant est le siège d'un champ magnétique; ce champ magnétique peut être décelé par les différents procédés classiques : déviation de l'aiguille aimantée, spectre à la limaille de fer, etc. Il est caractérisé qualitativement par la direction de ses lignes de force; elles se trouvent situées dans des plans perpendiculaires à la direction du fil, décrivent des circonférences ayant le fil pour centre, et leur sens, est le sens de rotation d'une vis à droite (tire-bouchon) qui se déplacerait sur le fil dans la direction du courant.*

2° *Si l'on suppose un circuit conducteur fermé situé dans un champ magnétique, toute variation dans l'intensité du champ magnétique extérieur, détermine la production d'un courant dans le circuit conducteur. Le champ magnétique extérieur et le courant qui lui donne naissance sont dits champ inducteur, courant inducteur. Le courant qui naît dans la boucle est dit : courant induit. Le sens du courant induit est déterminé par la règle suivante : il est tel que le champ magnétique qu'il produit tend à s'opposer à la variation du champ magnétique extérieur.*

On voit qu'un très grand nombre de procédés pourraient permettre d'obtenir des courants induits : déplacement de boucles métalliques dans des champs magnétiques d'intensité variable; modification dans l'inten-

sité du champ inducteur par variation d'intensité du courant inducteur, ou par tout autre procédé; déplacement d'aimants au voisinage de boucles métalliques ou inversement; déplacement de pièces métalliques dans des champs magnétiques.

Nous ne retiendrons qu'un seul exemple (fig. 10) : Soient deux circuits A et B, dont l'un (A) peut être fermé sur une force électromotrice E , au moyen d'un interrupteur I. Tant que l'interrupteur I n'est pas fermé, aucun champ magnétique n'existe au voisinage de B; quand on ferme l'interrupteur I, un courant s'établit en A, et un champ magnétique correspondant. La boucle B qui se trouvait dans un champ magnétique 0 se trouve maintenant dans un champ d'intensité déterminé i ; pendant la variation du champ de 0 à i , elle est le siège d'un courant induit; ce courant est tel que son champ tend à s'opposer à la variation du champ extérieur; cette variation ayant été positive le champ du courant

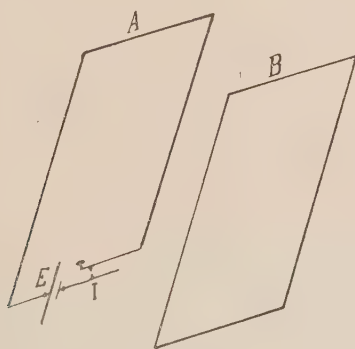


Fig. 10

induit doit être de signe contraire au champ extérieur; c'est dire que si nous supposons les deux boucles dans deux plans parallèles, à côté l'une de l'autre, le courant induit sera en sens inverse du courant inducteur.

Inversement, lorsque nous interrompons le courant dans le circuit A, le champ passe brusquement d'une intensité i à une intensité 0; pendant cette variation le circuit B est le siège d'un courant induit, qui, il est

facile de le voir, sera cette fois de même sens que le courant inducteur, de façon à ce que le champ induit s'oppose à la variation du champ inducteur. (1)

L'exemple que nous venons d'analyser, représente en réalité le schéma de la bobine d'induction; celle-ci est en effet constituée par deux circuits :

1°) un circuit inducteur, composé par un fil conducteur de faible résistance, gros et court, enroulé en un faible nombre de tours de spire autour d'un noyau de fer doux :

2°) un circuit induit formé par un fil conducteur de résistance plus forte, long et mince, enroulé en un grand nombre de tours de spire;

Pour faire varier la quantité d'électricité induite, et par conséquent l'efficacité excitante du courant induit on a proposé plusieurs méthodes :

1°) Modifier l'intensité du courant primaire, ce qui fait varier l'intensité du champ magnétique produit, et par conséquent la valeur du courant induit correspondant, la position relative des deux bobines, inductrice et induite restant constante. Mais ce procédé, signalé par Pflüger, utilisé par Preyer, Luchsinger, Rollett (2), présente, entre autres inconvénients, celui de nécessiter dans le circuit primaire la présence d'une résistance variable; or comme nous le montrons ulté-

(1) Par une extension qu'il est facile de faire, et que l'expérience vérifie, on peut concevoir, que ces phénomènes d'induction se produisent encore sur le circuit même où naît le courant inducteur; — et on vérifie, en effet, qu'au moment de la fermeture du courant en A, naît dans ce circuit un courant de sens inverse au courant que l'on établit (force contre électro-motrice d'induction) et dont le résultat est de ralentir notablement l'établissement du courant; — inversement au moment de l'ouverture, naît dans le circuit même une force contre électromotrice d'induction, de même sens que le courant que l'on rompt; — ces phénomènes qu'il est facile de constater au galvanomètre sont les phénomènes de *self induction*.

(2) *Pflüger*. Elektrotonus, Berlin, 1859.

Preyer. Myophysische Gesetz, Iena, 1874.

Luchsinger. Pflüger's Archiv., Bd. 8, 1874.

Rollett. Sitzungsberichte d. Wiener. Akademie LXX., 1874 (cités d'après Cyon, Methodik, 1876).

rieurement, l'introduction de résistances dans le circuit primaire modifie la durée et la forme des ondes induites, et par conséquent leur efficacité physiologique.

2°) Modifier la position relative des bobines inductrice et induite. Ce dernier procédé est aujourd'hui employé d'une manière presque exclusive; dans le chariot de Du Bois Reymond, le chariot de Ranvier, le chariot de Tripier, les deux bobines sont cylindriques, calées sur le même axe, et la bobine secondaire engaine la bobine primaire; on peut déplacer la bobine secondaire suivant l'axe même des bobines, devant une graduation qui exprime généralement en centimètres la distance des deux bobines. On peut aussi comme cela est réalisé sur certaines bobines (proposé par Bowditch) (1) faire tourner l'axe de la bobine secondaire autour de la bobine primaire. (Bobine de Bowditch, de Porter, de Kronecker); lorsque l'axe du primaire et du secondaire font un angle de 90° , le courant induit est nul; la loi de variation du courant induit en fonction de l'angle des deux axes est grossièrement la loi de variation du cosinus.

Sur le circuit primaire se trouve un interrupteur et la Force électromotrice; sur le circuit induit se trouvent les électrodes destinées à l'excitation.

I. Caractéristiques physiques des deux ondes, de fermeture et d'ouverture de la bobine d'induction.

Il est acquis que, à la fermeture du primaire (inducteur) naît dans le secondaire (induit), un courant de même sens que le courant inducteur, et qu'à l'ouverture du courant primaire naît dans le secondaire un courant de même sens que le courant inducteur;

Nous avons donc affaire à deux ondes induites : onde de fermeture, onde d'ouverture. Quels sont leurs caractères :

(1) *Bowditch*. A new form of inductive apparatus. Proceedings of the American Acad. of art. and. Sciences, 1875, 281-282.

1°) Elles sont l'une par rapport à l'autre de sens inverse. Cela résulte directement de ce que nous avons dit plus haut.

2°) La quantité d'électricité induite à la fermeture, et la quantité d'électricité induite à l'ouverture, sont égales, toutes choses (distance des bobines, intensité dans le primaire, etc.) étant égales d'ailleurs. Ceci peut être conçu théoriquement, mais on le vérifie expérimentalement au moyen d'un galvanomètre apte à mesurer les quantités d'électricité; ces galvanomètres dits *galvanomètres balistiques*, sont à oscillation lente, et non amortis; de sorte que, toute l'onde électrique ayant passé lorsque l'équipage mobile se déplace, l'élongation qu'ils donnent, si cette élongation reste petite, mesure la quantité d'électricité qui a passé. On vérifie avec ces galvanomètres que l'onde de fermeture et l'onde d'ouverture donnent des élongations égales et de signes contraires.

La quantité d'électricité induite tant à la fermeture qu'à l'ouverture est

$$Q = L \frac{I}{R}$$

ou L est le coefficient d'induction mutuelle des deux bobines;

I l'intensité du courant dans le primaire;

R la résistance du secondaire.

Quand au coefficient L , il est facile de voir qu'on peut le mesurer directement en mesurant Q , I et R ; mais il n'est pas possible de le calculer théoriquement à partir des constantes physiques des deux bobines; il dépend essentiellement du nombre de tours de spire du primaire et du secondaire, de leur section, et de la distance des bobines.

3° La durée de l'onde de fermeture est plus grande que la durée de l'onde d'ouverture; et il en résulte puisque les quantités induites sont les mêmes, que l'intensité atteinte par l'onde d'ouverture est plus grande que l'intensité atteinte par l'onde de fermeture, toutes choses restant égales d'ailleurs. A quoi tiennent les

différences de durée de l'onde de fermeture et de l'onde d'ouverture ?

Deux séries de phénomènes conditionnent la durée relative des ondes induites de fermeture et d'ouverture.

A) D'une part, ces deux ondes étant produites dans le secondaire par les variations de l'intensité dans le primaire, on conçoit que la durée des deux ondes soit fonction de la durée des périodes variables de fermeture et d'ouverture du circuit inducteur; or ces durées sont essentiellement différentes.

C'est Jos. Henry (1) qui a donné l'explication de cette différence; le circuit primaire, possédant du fait de la bobine primaire une self induction appréciable il se produit au moment de la fermeture du courant inducteur une force contreélectromotrice de self induction, qui est dirigée en sens inverse du courant inducteur, et qui ralentit son établissement; la fermeture du courant inducteur se fait d'une façon lente et progressive et dure un certain temps.

Helmholtz (2) a donné la formule qui permet de calculer la forme de l'établissement du courant lorsque une force électromotrice E , est appliquée à un circuit de Résistance ohmique R , et de self induction L ; l'intensité au temps t , comptée à partir du moment de la fermeture est

$$I_t = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right)$$

On voit que la rapidité avec laquelle l'intensité terminale de régime $\frac{E}{R}$ est atteinte dépend de la valeur de $\frac{L}{R}$; le temps au bout duquel l'intensité de régime $\frac{E}{R}$ est atteinte, est d'autant plus grand que $\frac{L}{R}$ est plus

(1) *Joseph Henry*. Transactions of the American Philosophical Society, 1839, 1840, 1843.

Poggendorfs Annalen 1842. Ergänzungsband.

(2) *Helmholtz*. Über d. Dauer und d. Verlauf der durch Stromschwankungen induzierten elektrischen Ströme. Poggendorfs Annalen, 83, 1851.

grand; $\frac{L}{R}$ est la constante de temps du circuit; le retard à l'établissement du courant est fonction directe de la self induction du circuit et fonction inverse de la résistance ohmique.

Si dans la formule ci-dessus on fait $t = \frac{L}{R}$ il vient

$$I_t = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-1} \right) \\ = \frac{E}{R} (0.633)$$

on voit que $\frac{L}{R}$ peut être considéré comme le temps au bout duquel l'intensité a atteint 0.633 de sa valeur finale.

A l'ouverture au contraire, l'extra courant de self induction qui tend à se produire et à prolonger la période variable, ne peut en réalité se produire, le circuit primaire étant rompu. La durée de l'ouverture est donc beaucoup plus brève que la durée de la fermeture; elle se fait presque instantanément, surtout si par un dispositif convenable on a pris soin d'éteindre l'étincelle, qui à l'ouverture éclate entre les contacts de l'interrupteur, et tend à prolonger la période variable. La durée pendant laquelle le courant inducteur varie, est donc plus grande à la fermeture qu'à l'ouverture; par suite l'onde induite d'ouverture dure moins que l'onde de fermeture.

B) Les caractéristiques physiques du circuit secondaire, où se développent ces deux ondes, influent aussi quoique d'une façon beaucoup moins intense sur leur durée absolue, et aussi sur le rapport de leurs durées; mais le secondaire présentant toujours une self importante la durée des deux ondes est augmentée, par le retard à l'établissement des ondes que conditionne la self. Ici encore c'est le rapport du circuit secondaire qui doit être considéré; le retard à l'établissement du courant augmentant avec la self, et diminuant avec la résistance; et ces facteurs affectent non seulement la durée absolue des deux ondes mais encore leur durée relative, car cette influence retardante, agit avec d'au-

tant plus d'efficacité que l'onde est plus rapide; — L'influence de la self du secondaire a donc pour effet de rapprocher de l'unité le rapport des durées de l'onde de fermeture, et de l'onde d'ouverture.

Ces considérations seront utilisées pour l'étude comparative de l'efficacité physiologique relative des différentes bobines d'induction employées.

On voit donc qu'il serait possible, par différents procédés d'égaliser les durées de l'onde induite de fermeture et de l'onde induite d'ouverture. On peut comme l'a fait Jos. Henry, augmenter la rapidité de la fermeture, en diminuant la valeur du rapport $\frac{L}{R}$ dans le primaire; il suffit pour cela d'augmenter considérablement la résistance ohmique sans self, dans ce circuit; de cette façon, on peut arriver à rendre la fermeture aussi rapide que l'ouverture, et par conséquent à rendre égales les durées des deux ondes induites. Mais on peut égaliser les deux ondes par un autre procédé.

Il est possible de ralentir la période variable d'ouverture, jusqu'à la rendre aussi longue que celle de fermeture; nous avons vu que la cause essentielle de la rapidité d'ouverture doit être cherchée dans ce fait que

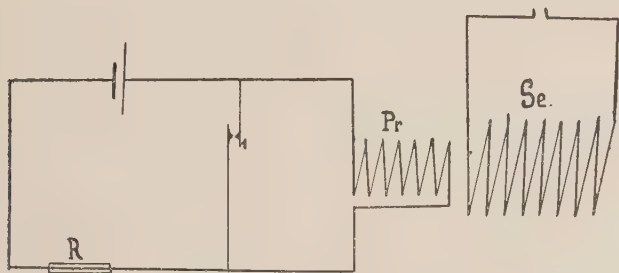


Fig. 11

l'extra courant ne peut se produire dans le circuit primaire ouvert; il suffit donc de permettre à ce courant de self induction de se produire, à la rupture, pour égaliser les durées des deux ondes induites; — pour cela (fig. 11) il suffit de faire les ouvertures de courant dans

la bobine primaire par fermeture d'un court circuit; au moment où l'on ferme le court circuit, le courant se trouve interrompu dans le primaire; mais la force électromotrice de self induction qui se produit donne naissance à un extra courant de rupture, qui se ferme dans le court circuit, qui est de même sens que le courant primaire, et qui remplace la rupture brusque, par une décroissance graduelle; — Jos. Henry a également constaté que dans ces conditions, le choc d'induction de fermeture s'égalisait au choc d'induction de fermeture.

Mais les procédés que nous venons de décrire ne sont pas les seuls qui permettent de faire varier la durée relative des deux ondes; Wedensky (1) a montré que si l'on fait sur la bobine primaire, et sur la bobine secondaire, des enroulements bifilaires, l'un de ces enroulements étant fermé sur lui-même, on obtient des courants d'induction de fermeture et d'ouverture égaux. Engelmann (2) a montré, qu'au contraire si l'on introduit dans le primaire, une bobine de self, avec noyau de fer doux, on peut augmenter la différence de durée des deux ondes dans des proportions considérables (il a pu centupler cette différence).

Au point de vue pratique on voit que tout facteur qui modifie le rapport $\frac{L}{R}$ dans le primaire ou dans le secondaire, modifie le rapport des durées de l'onde induite de fermeture et de l'onde d'ouverture; en fait, ce qui importe surtout, pour avoir un rapport constant de durée des deux ondes c'est le rapport $\frac{L}{R}$ du primaire, car, dans ce circuit la résistance est généralement très faible, de sorte que $\frac{L}{R}$ a une valeur considé-

(1) *Wedensky*. Archives internationales de Physiologie. 5 (p. 51-52). Zeitschrift fur biol. Technik. und Methodik I. (97-104).

Locke. Journal of Physiology, 28, physiol. Society, p. 17-19.

(2) *Engelmann*. Ber. d. preusz. Akad. 1905.

nable; et que les moindres variations de résistance font varier beaucoup la valeur de $\frac{L}{R}$; au contraire le circuit extérieur secondaire comportant toujours de fortes résistances (corps humain, électrodes) les petites variations de résistance n'atteignent que d'une façon à peine sensible la valeur de $\frac{L}{R}$.

De même tout facteur qui modifie la rapidité des interruptions dans le primaire, modifie également la durée relative des deux ondes. Nous critiquerons ultérieurement la technique des interruptions.

La courbe d'établissement du courant et la courbe de rupture, ainsi que la forme des ondes induites de fermeture et d'ouverture peuvent être étudiées expérimentalement, au moyen de galvanomètres spéciaux, appelés oscillographes; un oscillographe, est un galvanomètre de période extrêmement brève très exactement amorti, et dont la déviation est à chaque instant, à une excellente approximation, proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse. Le galvanomètre porte un miroir, et l'on enregistre photographiquement par un dispositif facile à concevoir, les déviations de l'oscillographe. Plusieurs auteurs ont publié des oscillogrammes de bobines d'induction très instructifs; citons seulement G. Weiss, Lewis Jones, L. Lapique (1).

Nous reproduisons ici quelques oscillogrammes choisis parmi ceux publiés par Lewis Jones, oscillogrammes sur lesquels on pourra lire :

(1) *George Weiss*. Sur les appareils magnéto-faradiques utilisés en médecine (Comptes Rendus. Soc. de Biol., 28 déc. 1901. Annales d'Electrobiologie, vol. 5.)

Louis Lapique. Oscillogrammes de différentes ondes électriques appliquées à l'excitation. J. de Phys. et de Path. gén., sept. 1904.

Lewis Jones. Graphiques du courant faradique et d'autres courants intermittents.

Archives d'Electricité médicale, 1904

Bretish Medical Journal, 1904.

a) L'égalité de durée de la période variable à la fermeture et à l'ouverture dans un circuit sans self appréciable. (fig. 12. A).

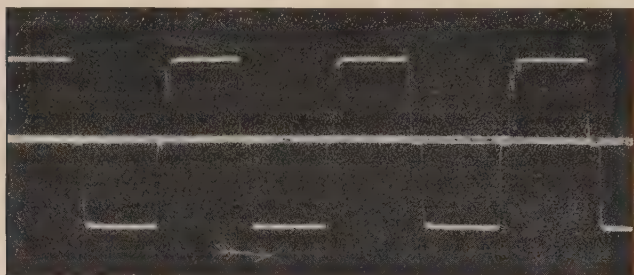


Fig. 12 (A)

b) La différence considérable de la période variable à la fermeture et à l'ouverture dans un circuit primaire à self appréciable (fig. 12. B).

c) La forme des ondes induites d'une bobine d'induction ainsi que la forme de la fermeture et de l'ouverture dans le circuit primaire (fig. 13. A.) (1) On voit que les deux ondes sont de signe contraire; que l'onde de fermeture dure plus que l'onde d'ouverture et atteint une intensité plus faible qu'elle. Quant à

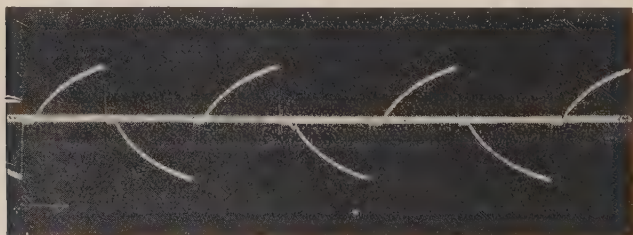


Fig. 12. (B)

l'égalité des quantités induites à la fermeture et à l'ouverture elle résulte de l'égalité de surface des deux ondes.

(1) Oscillogrammes empruntés à l'article de Lewis Jones des Archives d'Electricité médicale; je remercie très vivement M. Bergonié et M. Hamel, d'avoir bien voulu me communiquer les clichés.

Nous reproduirons en outre un oscillogramme correspondant à l'une des bobines que nous avons em-



Fig. 13. (A)

ployées (3390 ohms) on y lira la forme de la fermeture et de l'ouverture dans le circuit primaire, ainsi que la forme des deux ondes induites correspondantes. (fig. 13. B). (1).

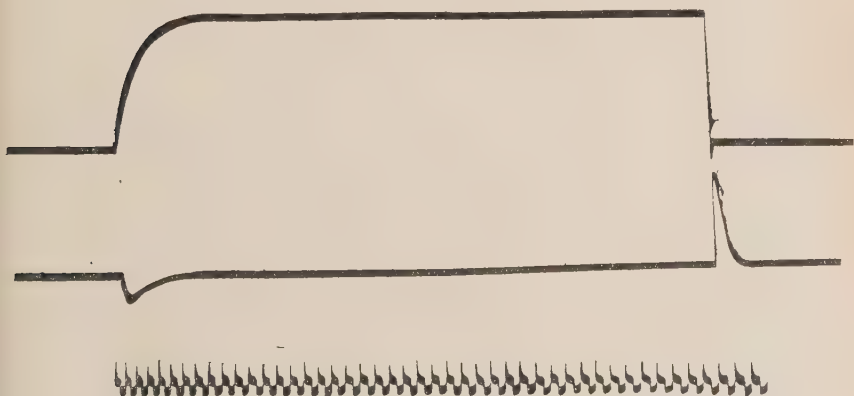


Fig. 13. (B)

(1) Oscillogramme pris dans le laboratoire de M. Blondel que nous ne saurions trop remercier de son amabilité ; j'adresse aussi des remerciements très vifs à MM. Camille Rapp et Villemain pour la complaisance avec laquelle ils ont mis à notre service leur haute habileté technique dans la prise des oscillogrammes.

II. Efficacité physiologique relative des ondes de fermeture et d'ouverture de la bobine d'induction.

La bobine d'induction étant l'un des instruments d'excitation dont les physiologistes se sont servis le plus anciennement et avec le plus de prédilection, la différence d'efficacité physiologique des deux ondes qu'elle fournit est une notion très ancienne et universellement admise; on sait que toutes choses étant égales d'ailleurs, l'onde d'ouverture est plus efficace que l'onde de fermeture; c'est là une loi générale que l'on peut constater avec une extrême facilité sur tous les tissus excitables, pourvu que l'on prenne les précautions suivantes :

1°) Inverser le sens du courant entre les deux déterminations pour que, les deux ondes étant de signe contraire et l'une d'elles étant redressée par l'inversion du sens, les deux observations soient faites en définitive dans le même sens du courant, les deux excitations naissant alors à la même électrode.

2°) Faire ces deux déterminations en *courant descendant*; cette précaution est nécessaire : en effet, on a démontré (1) que pour les ondes brèves comme pour les fermetures de courant galvanique l'excitation naissait toujours à la cathode; donc, dans le cas du courant descendant seulement l'excitation née à la cathode pourra se propager librement jusqu'au muscle; en courant ascendant au contraire elle rencontrerait sur sa route des régions anélectronisées, et anélectrotonisées sans doute d'une façon différente pour l'onde de fermeture et pour l'onde d'ouverture; aussi ces modifications anélectrotoniques feraient varier l'efficacité relative apparente des deux ondes de fermeture et d'ouver-

¹ Ektrotonus.

(1) de la physiologie, 1859, 1860.

de Physiologie normale et pathologique,

Si l'on prend les précautions que nous venons de dire, on constate invariablement sur tous les tissus, normaux ou pathologiques, ou soumis à des conditions expérimentales diverses, que l'onde d'ouverture est plus efficace que l'onde de fermeture. Ce fait se manifeste de la façon suivante : si l'on rapproche progressivement les bobines en cherchant à observer la plus petite contraction possible, on constate que pour une certaine distance des bobines on obtient une contraction à l'ouverture du primaire, mais rien à sa fermeture; il faut rapprocher beaucoup les bobines pour voir enfin apparaître une contraction à la fermeture.

C'est une notion extrêmement ancienne en électrophysiologie; on en trouve déjà l'exposé, dans Du Bois Reymond (1) et avant lui Helmholtz (2) avait signalé ces différences d'action physiologique des deux ondes induites sur les préparations neuromusculaires. Depuis, tous ceux qui ont pratiqué l'excitation par les courants d'induction, ont incidemment vérifié l'exactitude de cette notion. (3)

C'est dire qu'il faut une quantité d'électricité plus grande pour exciter un tissu avec l'onde de fermeture qu'avec l'onde d'ouverture; ce résultat, établi empiriquement depuis longtemps peut être déduit théoriquement avec une grande simplicité des notions que nous avons relativement à la loi d'excitation.

(1) *Du Bois Reymond*. Untersuchungen uber thierische Electricität, 2^e vol., p. 404.

Du Bois Reymond. Gesammelte Abhandlungen, zur allgemeinen Muskel und Nerven Physik, 1^{er} vol., 1875, p. 228 (Ueber den Zeitlichen Verlauf voltaelectrischer Inductionsströme).

(2) *Helmholtz*. Müllers Archiv., 1848, p. 155.

(3). Gildemeister cependant a établi le fait suivant : si au lieu de considérer les seuils de fermeture et d'ouverture, on apprécie l'efficacité des deux ondes, par la hauteur des secousses qu'elles provoquent pour des excitations sous maximales, on observe d'une façon constante que les secousses provoquées par l'excitation de fermeture sont beaucoup plus fortes que les secousses provoquées par l'excitation d'ouverture, pour une même distance des bobines. Ce fait qui semble certain, mais qui n'a pas reçu encore d'explication complètement satisfaisante n'entache en rien la validité de la loi que nous avons énoncée relativement à l'efficacité des deux ondes appréciée par la précocité des deux seuils, (Pflüger's Archiv. 140, p. 610).

Rappelons simplement que si l'on excite un tissu par des ondes brèves de durée t_1, t_2, t_3 , ces ondes seront liminaires à condition que les quantités q_1, q_2, q_3 , qu'elles dépenseront soient reliées aux durées correspondantes t_1, t_2, t_3 , par la formule :

$$Q = A (t + \tau)$$

C'est dire que si nous prenons deux ondes de durée t et t' , t' (onde de fermeture par exemple) étant plus grand que t (onde d'ouverture) ($t' > t$), les quantités d'électricité liminaires seront respectivement

$$Q_t = A (t + \tau)$$

$$Q_{t'} = A (t' + \tau)$$

Il apparaît nettement que si t' est $> t$, la quantité $Q_{t'}$ liminaire avec l'onde de fermeture t' sera plus grande que Q_t liminaire avec l'onde d'ouverture.

On voit donc que si l'on admet la validité de la loi d'excitation

$$Q = A (t + \tau)$$

ainsi que sa généralité, la validité de la loi que nous avons énoncée relativement à l'efficacité des deux ondes de fermeture et d'ouverture, se trouve théoriquement fondée, et sa généralité même se trouve démontrée.

Il va sans dire que tous les facteurs que nous avons précédemment signalés, et qui font varier les caractéristiques physiques des deux ondes de fermeture et d'ouverture, font varier de ce fait leur efficacité physiologique relative. Rappelons que l'on pourra augmenter les différences d'efficacité en augmentant la self induction et diminuant la résistance du primaire; qu'on pourra au contraire diminuer ces différences en introduisant dans le primaire des résistances sans self induction (la fermeture tend à s'égaliser à l'ouverture), ou en faisant l'ouverture du primaire, par fermeture d'un court circuit sur la bobine primaire (l'ouverture tend à s'égaliser à la fermeture); enfin en faisant sur les deux bobines des

enroulements bifilaires suivant le mode imaginé par Wedensky. Sur les variations de l'efficacité physiologique relative des deux ondes, suivant les caractéristiques physiques relatives du circuit voir les recherches déjà mentionnées de J. Henry, Helmholtz, Du Bois Reymond, Engelmann, Locke, Wedensky (loc. cit.) ; voir aussi le travail de Courtade (1), où cet auteur confirme le fait établi plus de trente ans avant, que l'introduction de résistances dans le circuit primaire, égalise la fermeture à l'ouverture.

Quant à la question de savoir *si le degré d'efficacité relative des deux ondes varie suivant les différents tissus considérés* ou pour un même tissu suivant son état pathologique ou physiologique (dégénérescences intoxications, température, etc.), cette question a été très peu étudiée jusqu'à ces dernières années.

Nous citerons seulement pour mémoire, et sans y insister les travaux de Joteyko (2) effectués pour déterminer par l'inscription graphique la variation qualitative de l'efficacité relative des deux ondes de fermeture et d'ouverture, sous l'influence de la fatigue, et de l'anesthésie. Mais il s'agit ici d'ondes maximales ou sous maximales, et non d'ondes liminaires, et il n'est pas possible de tirer des recherches de cet auteur, des conclusions relatives au sujet qui nous occupe.

Trois séries de recherches seulement seront analysées ici : celles de Julius Schott, celles de Piotrovsky celles de M. Lapicque et J. Weill.

Les recherches de Julius Schott et celles de Piotrovski, sont en fait purement qualitatives, car ces auteurs expriment tous deux l'efficacité des deux ondes par la distance des bobines où les ondes deviennent excitantes; or, cette graduation en cm, est pure-

(1) Courtade. Archives de Physiol. Normale et Path., 1892 (369-373). 514-521.

Comptes Rendus Soc. Biologie, 1891, p. 789-791.

(2) Joteyko Travaux de l'Institut Solvay, 5, p. 1-38.

Annales d'Electrobiologie, 5, p. 373-381.

ment empirique, et dépourvue de toute signification précise, parce que d'une part elle n'atteint nullement les véritables facteurs de l'excitation, qui sont les caractéristiques électriques de l'onde étudiée (quantité, intensité, énergie, etc.), et parce que d'autre part, ces caractéristiques sont des fonctions très complexes, variables pour chaque bobine, et non encore calculables, de la distance des bobines.

Ces réserves faites relativement à la portée de leurs expériences, il importe de signaler les résultats qualitatifs intéressants qu'elles comportent.

J. Schott (1) recherche à quelle distance des bobines se produisent les seuils, pour l'onde de fermeture et pour l'onde d'ouverture, suivant que le tissu excité est le gastrocnémien de *Bufo vulgaris* ou celui de *Rana esculenta*, et il observe d'une façon constante les faits suivants : La différence d'efficacité des deux ondes est beaucoup plus grande chez la grenouille que chez le crapaud.

Exemples : en moyenne sur *Bufo*, le seuil d'ouverture est obtenu à 17 cm d'écartement, le seuil de fermeture à 14 cm. Sur *Rana* au contraire le seuil d'ouverture est obtenu à 30 cm, le seuil de fermeture à 14 cm. Certes, il n'est pas possible de faire sur ces chiffres des mesures quantitatives exactes d'efficacité relative des deux ondes; tout au moins on peut affirmer que le rapport des quantités d'électricité liminaires est plus grand sur la grenouille que sur le crapaud; l'indice de vitesse du gastrocnémien de grenouille est plus grand que l'indice de vitesse du gastrocnémien de crapaud. Cela concorde avec la notion maintes fois confirmée, que le gastrocnémien de grenouille est un tissu plus rapide que le gastrocnémien de crapaud; et Schott en donne une preuve nouvelle dans la suite même de son mémoire lorsqu'il démontre que le muscle de crapaud est plus sensible aux courants lentement croissants que le muscle de grenouille.

(1) Schott Julius — Ein Beitrag zur elektrischen Reizung des quergestreiften Muskels von seinen Nerven aus. Pflügers Archiv. t. 48, 1891, p. 354.

Enfin Schott établit une nouvelle notion : la différence d'efficacité des deux ondes s'atténue considérablement lorsque la tension du muscle augmente.

Piotrovski (1) au cours de recherches effectuées pour déterminer le point de départ de l'excitation dans le cas de chocs d'induction, a été amené à mesurer des seuils d'ondes de fermeture et d'ouverture, sur des tissus soumis aux vapeurs d'alcool; il opérait sur des nerfs de grenouille, qui traversaient une petite chambre de paraffine où se trouvaient les deux électrodes, et où pouvaient circuler des vapeurs d'alcool à 1/5.

La fermeture étant faite en courant descendant et l'ouverture en courant ascendant, les résultats obtenus sont les suivants :

TEMPS		SEUIL (distance en cm.)	
AVANT ALCOOL	POUR L'OUVERTURE ASCENDANTE	POUR LA FERMETURE DESCENDANTE	
2 h. 35 minutes	290	170	
PENDANT LE PASSAGE DE L'ALCOOL (1/5)			
2 h. 40	280	150	
2 h. 45	170	150	
2 h. 50	130	145	
2 h. 55	100	140	
3 h.	90	130	

On voit que, au cours de cette expérience la fermeture est devenue plus efficace que l'ouverture; le rapport d'efficacité s'est inversé; mais ces expériences ne sont pas directement interprétables au point de vue qui nous occupe, car si l'excitation de fermeture, faite en courant descendant, se propage bien sans obstacle de la cathode au muscle, l'excitation d'ouverture faite en courant ascendant, naît en un autre point du tissu, et d'autre part passe pour aller au muscle sur une région anélectrotonisée, et anélectrotonisée de façon différente suivant le temps pendant lequel l'alcool a passé; il y a donc ici superposition de deux facteurs, modifications anélectrotoniques d'une part, intéressant d'une façon exclusive l'une des excitations, et d'autre part modifi-

(1) *Piotrovski*. Archives de Physiologie Normale et Pathologique, 1893, p. 351. — Sur une nouvelle méthode pour démontrer le point de départ de l'excitation.

cation certaine du rapport d'efficacité des deux ondes, mais il est impossible de faire ici la part de l'un et de l'autre facteur.

Bien plus intéressantes au point de vue qui nous occupe sont les expériences suivantes dans lesquelles Piotrovski a fait des fermetures et des ouvertures, toutes deux descendantes. Les résultats obtenus sont les suivants :

TEMPS	SEUIL (distance en cm).	
AVANT ALCOOL	FERMETURE DESCENDANTE	OUVERTURE DESCENDANTE
2 h. 40	190	310
ALCOOL 1/5		
2 h. 45	165	295
2 h. 50	140	225
2 h. 55	130	180
3 h.	125	160
3 h. 5	110	120
3 h. 10	110	120

Ici le rapport d'efficacité ne s'est pas inversé; la différence d'efficacité s'est seulement considérablement atténuée. Mais ici les modifications anélectrotoniques n'interviennent pas, les deux excitations étant faites en courant descendant, naissant toutes deux au même point du tissu (cathode instrumentale) et se propagent jusqu'au muscle sans obstacle; il est ici certain que le passage d'alcool atténue la différence d'efficacité des deux ondes : l'indice de vitesse a diminué.

Ainsi les quelques faits expérimentaux recueillis par Schott et par Piotrovski, d'une part, la théorie des indices de vitesse, laissent prévoir que le rapport des quantités d'électricité liminaires pour l'onde de fermeture et l'onde d'ouverture, varie suivant la nature des tissus, et suivant leur état physiologique.

En 1909, M. Lapicque et J. Weill (1), guidées par des idées théoriques, ont étudié le rapport d'efficacité des deux ondes. Elles ont envisagé la question avec une grande généralité, en étudiant différents tissus, dans des circonstances expérimentales variées; de plus elles l'ont traitée quantitativement avec une grande préci-

(1) M. Lapicque et J. Weill. C. R. Soc. Biol., 1909.

sion en mesurant non plus les distances en centimètres, mais les quantités d'électricité effectivement nécessaires pour produire le seuil de l'excitation à la fermeture et à l'ouverture. Rattachant ensuite ce rapport d'efficacité à la notion de vitesse d'excitabilité, elles ont déterminé les bases mêmes de la méthode que nous avons appliquée à l'homme.

Elles ont montré sur différents tissus animaux, que le rapport des quantités d'électricité liminaires est une mesure de la vitesse d'excitabilité; et qu'il range les tissus dans l'ordre même où les range leur chronaxie. On peut très facilement concevoir ces résultats au point de vue théorique, en se rapportant au chapitre précédent intitulé « Théorie des indices de vitesse ».

Exemples tirés de la note des auteurs :

TISSU	RAPPORT DES QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ LIMINAIRES
Gastrocnémien de Rana	14.4
Queue de l'Écrevisse	12.6
Droit antérieur de Rana	4.6
Langue de Rana	4.

On voit nettement ici la variation de l'efficacité relative des deux ondes suivant la rapidité des tissus : le rapport considéré est bien un indice de vitesse puisque ces vitesses vont en décroissant depuis le gastrocnémien, jusqu'à la langue de la grenouille.

M. Lapicque et J. Weill, ont montré ensuite que ce rapport, augmente avec la température, diminue sous l'influence de la curarisation, comme la vitesse de contraction, la vitesse de conduction, la vitesse d'excitabilité elle-même. Et les auteurs concluent que cette dernière caractéristique physiologique d'un tissu excitable, peut être appréciée au moins en première approximation avec la bobine d'induction.

TROISIÈME PARTIE

Vitesse d'excitabilité chez l'homme
à l'état normal
et dans divers états pathologiques



CHAPITRE I

HISTORIQUE. - RECHERCHES DE DOUMER

REISS - CLUZET

Dans une série de publications relativement récentes, E. Doumer (1) a donné une méthode d'étude de l'excitabilité par décharges de condensateurs, que nous devons analyser et critiquer; elle contient une mesure de « *constante de temps* » sur les muscles de l'homme; nous l'étudierons d'une façon particulièrement détaillée parce que le Congrès international d'Electrothérapie réuni à Barcelone en 1911, a dans un vœu formel, recommandé à tous ceux qui font journellement de l'électrodiagnostic la pratique de cette méthode, dans la forme même où l'a présentée E. Doumer.

E. Doumer propose de mesurer par l'emploi des décharges de condensateur, diverses constantes, dont nous allons, en suivant pas à pas son mémoire, analyser la signification.

Soit la formule qui lie le voltage liminaire à la capacité : (2)

$$V = \alpha + \frac{\beta}{C} (I)$$

(1) E. Doumer. Note sur la loi d'excitation par les décharges de condensateurs, Annales d'Electrobiologie, avril 1910, p. 21.

Signification et valeur des constantes que l'on obtient par la méthode des décharges. Annales d'Electrobiologie, mars 1911, p. 145.

Technique de l'Electrodiagnostic par décharges de condensateurs. Annales d'Electrobiologie, avril 1911, p. 218.

(2) Nous conservons ici la notation de Doumer, en signalant seulement qu'elle est inverse de la notation que nous avons antérieurement utilisée; α correspond au b, et β au a des formules précédemment écrites.

Lorsque la capacité est extrêmement grande : on a $\frac{\beta}{C} = 0$ et par suite

$$V = \alpha ;$$

donc α est le voltage nécessaire pour produire le seuil de l'excitation avec une capacité extrêmement grande; α est le voltage minimum dans des conditions expérimentales données. Ce voltage est fonction de la résistance du circuit; il lui est proportionnel

$$\alpha = x R$$

ou x est l'intensité minima, toujours la même, correspondant aux voltages V, V', V'', V''' , nécessaires pour produire le seuil, lorsque, la capacité restant constante et très grande la résistance du circuit prend des valeurs R, R', R'', R''' .

Quant à β sa signification est claire; en multipliant les deux membres de l'égalité (I) par C , il vient :

$$VC = \alpha C + \beta$$

ou

$$Q = \alpha C + \beta \quad (II)$$

cette équation, pour la capacité $C = 0$, s'écrit :

$$Q = \beta$$

donc β est « la quantité d'électricité minima nécessaire pour produire le seuil avec un condensateur de capacité nulle » (I).

Doumer signale que β , et x , représentent non pas les quantités et l'intensité minima réellement nécessitées par la mise en jeu du processus d'excitation, mais la quantité et l'intensité minima qui passent réellement entre les électrodes, en y comprenant celle qui se perd dans les tissus et n'est pas utilisée pour l'excitation; pour une position donnée des électrodes si l'on appelle β_t et x_t les quantités et intensités minimales totales, et β_u et x_u les quantités et intensités minimales réellement utiles on peut écrire :

$$\beta_t = n \beta_u$$

$$x_t = n x_u$$

Doumer caractérise ensuite un quatrième paramètre de l'excitabilité, qu'il désigne par τ , qu'il appelle constante de temps, et qu'il obtient en divisant β_t par α_t : β_t étant une quantité et α_t une intensité, leur quotient est effectivement un *temps*. Que signifie cette durée ?

Physiquement elle signifie « le temps pendant lequel l'intensité minimale doit passer pour donner la quantité minimale ». (1) Elle est en effet le quotient de la quantité minima nécessaire pour produire le seuil (avec une capacité nulle) par l'intensité minima nécessaire pour produire le seuil (pour une capacité infinie).

Quand à la signification physiologique de cette durée E. Doumer la définit dans les termes suivants (2).

« Si nous avons trouvé pour un nerf :

$$\beta_t = 0,33 \text{ mc}$$

$$\alpha_t = 0,0025 \text{ a}$$

et par suite

$$\tau = 0'',000132$$

« Nous dirons qu'un courant de 2,5 mas, doit passer pendant 132 millionièmes de seconde pour produire la quantité 0,33^{mc} nécessaire à l'excitation.

Ici, signalons qu'une première erreur s'introduit dans le raisonnement; on ne peut dire comme le fait Doumer, d'une manière absolue que 0,33^{mc} est la quantité nécessaire à l'excitation; 0,33^{mc} ne produit l'excitation que dans un cas bien défini, à savoir lorsque l'on considère le cas théorique limite d'une capacité *nulle*.

« Mais nous n'aurons pas le droit de dire, pour le moment du moins, que ce nerf, pour répondre à l'excitation doit être excité pendant 132 millionièmes de seconde.

« Il est probable, en effet, il est dans tous les cas possible que l'élément agissant dans l'excitation est

(1) Doumer. loc. cit., p. 150.

(2) Doumer. loc. cit., p. 150.

« la quantité d'électricité et que pour que le nerf
 « réponde, il faut qu'une quantité déterminée, carac-
 « téristique s'écoule à travers le nerf dans un laps de
 « temps maximum. On conçoit que suivant le voltage
 « de charge on puisse faire écouler à travers le nerf la
 « quantité β_u en un laps de temps très variable; il n'y
 « aurait excitation que si la quantité β_u ne met pas
 « plus de 132 millièmes de secondes pour traver-
 « ser le nerf.

« τ serait donc la limite supérieure de la durée de
 « l'excitation électrique. »

Or, ces interprétations doivent être complètement
 rejetées. Les deux dernières phrases que nous venons
 de citer, à savoir « il n'y aurait excitation que si la
 quantité β_u ne met pas plus de 132 millièmes de
 secondes pour traverser le nerf; τ serait donc la limite
 supérieure de la durée de l'excitation électrique »
 constituent des hypothèses gratuites, qu'aucune con-
 sidération théorique, aucune déduction ou aucun fait
 expérimental ne fonde; bien plus elles sont en contra-
 diction formelle avec les données les plus certaines et
 les plus universellement adoptées sur la loi d'excita-
 tion.

En effet β_u , est, d'après ce que nous avons dit plus
 haut et d'après la définition même que E. Doumer en
 a donnée, la quantité d'électricité minima nécessaire
 pour produire le seuil de l'excitation avec une capacité
 égale à zéro, c'est-à-dire pour une décharge de durée
 nulle. Donc, dès que la quantité β_u s'écoule dans un
 temps > 0 , en particulier dans un temps compris entre
 0 et 132/1000.000 de seconde, cette quantité reste sous
 liminaire et tombe de plus en plus au-dessous du
 seuil, à mesure que la durée de la décharge augmente;
 ceci en vertu même de la loi d'excitation.

$$Q = \beta + \alpha C$$

qui exprime ce simple fait : à mesure que la durée de
 passage augmente (ou la capacité du Condensateur, à
 résistance constante) la quantité d'électricité liminaire

augmente. L'affirmation qu'il y a excitation lorsque la quantité β_u s'écoule dans un temps plus petit que τ , est en opposition formelle avec l'énoncé même de la loi des quantités. En conséquence nous ne pouvons accepter l'interprétation donnée par l'auteur de sa constante de temps τ : L'auteur ajoute (1).

« A priori on pourrait admettre que, toutes choses égales d'ailleurs l'excitabilité électrique d'un nerf « est proportionnelle à la valeur de τ .

Ceci est une nouvelle affirmation qui ne se rattache à rien de connu, et que rien ne légitime ; on pourrait également admettre « à priori » sans plus de légitimité d'ailleurs que « l'excitabilité » est inversement proportionnelle à la valeur de τ . L'auteur continue :

« Exemple : Si on avait trouvé que pour exciter un « nerf il faut avec le pôle positif une quantité $^+\beta_t = 0.45$, s'écoulant pendant le temps $^+\tau = 0,000132$, et avec le pôle négatif une quantité $^-\beta_t = 0.45$ s'écoulant pendant le temps $^-\tau = 0.000250$.

« Nous pourrions dire, (les quantités utiles β_u étant « les mêmes, puisque les quantités totales β_t sont les « mêmes) que le nerf est plus excitable au pôle négatif « qu'au pôle positif, car les variations de la quantité « pendant des temps extrêmement petits, égaux « sont plus petites avec le pôle négatif qu'avec le pôle « positif; elles sont si l'on prend comme unité de « temps le millionième

de $\frac{\beta_u}{250}$ avec le pôle négatif.

de $\frac{\beta_u}{132}$ avec le pôle positif.

« Le nerf peut être considéré comme plus excitable « par le pôle négatif, puisqu'il réagit à des variations « plus petites de la quantité. »

Que vaut cette manière d'apprécier l'excitabilité d'un tissu ? on voit en quoi elle consiste ; il s'agirait

(1) Doumer. loc. cit., p. 151.

de déterminer la quantité d'électricité minima nécessaire β , et ensuite la constante de temps τ de l'excitabilité; dès lors admettant (ce que nous avons montré être complètement dépourvu de fondement et certainement inexact) que la valeur de τ , représente « la limite supérieure de la durée de l'excitation » c'est-à-dire « le laps de temps maximum » durant lequel la quantité β_u pourrait s'écouler tout en restant efficace, on obtiendrait en divisant β_t par τ , la quantité minima qui doit passer dans l'unité de temps pour rester efficace; plus cette quantité serait petite, plus l'excitabilité considérée serait grande.

Il est facile de voir que cette méthode aboutit à l'élimination complète de la notion de constante de temps, dans l'estimation de l'excitabilité d'un tissu; c'est d'ailleurs la conclusion même du travail de E. Doumer: En effet, d'après la méthode de cet auteur, la comparaison de deux excitabilités (positive et négative par exemple), revient à la comparaison des deux quotients.

$$\frac{+\beta_t}{+\tau} \quad \text{et} \quad \frac{-\beta_t}{-\tau}$$

mais on sait que, $\tau = \frac{\beta_t}{x_t}$ (constante de temps = quotient de la quantité d'électricité minima β_t nécessaire pour une capacité 0, par x_t , intensité nécessaire pour une capacité infinie); il vient donc $x_t = \frac{\beta_t}{\tau}$; c'est dire que la comparaison de

$$\frac{+\beta_t}{+\tau} \quad \text{et} \quad \frac{-\beta_t}{-\tau}$$

se ramène à la comparaison des intensités minimales

$$+x_t \quad \text{et} \quad -x_t$$

et le « rapport de ces deux intensités minimales donnera le rapport inverse des excitabilités ».

On voit à quelle étrange conclusion conduit l'interprétation erronée de la constante de temps (1), et la méthode d'estimation de l'excitabilité qui en résulte. Cette méthode d'appréciation aboutit à négliger la constante de temps dans la mesure de l'excitabilité; elle est erronée, comme la conception de la constante de temps qui en est la source, et doit être rejetée avec elle.

Dans l'application de sa méthode à l'étude des excitabilités au pôle positif et au pôle négatif, Doumer n'est guère plus heureux, il introduit un postulat fondamental, que nous devons critiquer ici quoiqu'il ne touche pas directement à la notion de constante de temps. Doumer, se propose essentiellement dans ses recherches, de caractériser au moyen des décharges de condensateur, une excitabilité objective au pôle positif, et une excitabilité objective au pôle négatif, de façon à pouvoir les comparer, et à retrouver en les mesurant exactement les phénomènes d'inversion symptomatiques des réactions de dégénérescence; or, pour faire cette comparaison, il ne faut pas se contenter de comparer les intensités minimales *totales*, les quantités minimales *totales*, nécessaires pour atteindre le seuil de l'excitation suivant que l'électrode placée sur le tissu excité est négative ou positive; ce qu'il faut évidemment comparer, ce sont les intensités, les quantités minimales *utiles*. Or, Doumer postule que le rapport de la quantité d'électricité minima totale nécessaire, à la quantité d'électricité minima utile est le même, que le pôle différencié soit positif ou qu'il soit négatif. En somme, si l'on recherche successivement α_1, β_1 et α_u, β_u avec le pôle négatif et le pôle positif différenciés on a,

(1) Remarquons en passant que Doumer ne cite dans son travail ni Weiss, ni Cluzet, ni Lapique, ni Keith Lucas, en somme aucun des auteurs qui ont fondé la notion de constante de temps de l'excitation, en lui attribuant une signification radicalement différente comme nous l'avons vu, de celle que lui attribue Doumer.

$$+ \beta_t = + n \beta_u$$

$$+ \alpha_t = + n \alpha_u$$

$$- \beta_t = - n \beta_u$$

$$- \alpha_t = - n \alpha_u$$

et Doumer postule que dans toute ces équations n est constant; ce postulat est à la base même du raisonnement de Doumer : il est maintes fois utilisé (1); il entre même dans les considérations relatives à l'utilisation de la constante de temps. Il permet de substituer à la comparaison des quantités utiles, la comparaison des quantités totales et à la comparaison des intensités utiles, celle des intensités totales. Ce postulat est-il fondé ?

On sait que si, utilisant la méthode d'excitation dite monopolaire, on recherche les seuils de l'excitation pour des courants de longue durée avec l'électrode différenciée faite successivement négative puis positive, on trouve des seuils différents; le seuil de la fermeture négative est plus bas que le seuil de la fermeture positive; étudiant ces faits dans leurs détails, Chauveau avait admis qu'il existait bien deux excitabilités du tissu l'une au pôle positif l'autre au pôle négatif, à la fermeture du courant, que ces deux excitations se produisaient bien à l'électrode différenciée, l'autre électrode (diffuse) étant complètement inactive; et que normalement l'efficacité excitante du pôle positif est plus faible que l'efficacité excitante du pôle négatif. Cette conception a été admise par la plupart des électrophysiologistes ou électrothérapeutes

(1) Doumer. loc. cit., p. 151. « Nous pourrions dire (les quantités β_u utiles étant les mêmes, puisque les quantités β_t sont les mêmes), etc... »

Doumer. Loc. cit., p. 152, en haut de la page.

$$\frac{+ \beta_t}{- \beta_t} = \frac{n + \beta_u}{n - \beta_u} = \frac{+ \beta_u}{- \beta_u}$$

Doumer. Loc. cit., p. 152 en bas de la page.

$$\frac{+ z_t}{- z_t} = \frac{n + z_u}{n - z_u} = \frac{+ z_u}{- z_u}$$

français (Boudet de Paris (1), Charbonnel Salle (2), Courtade (3), etc.) et c'est elle qui légitimerait si elle était justifiée le postulat introduit par Doumer; en effet les deux excitations se produisant bien au même point du tissu, et les électrodes instrumentales étant restés immobiles il n'y aurait guère de raisons *a priori* d'admettre que le rapport de la quantité d'électricité minima totale nécessaire à la quantité minima utile varie suivant qu'on fait des déterminations avec le rôle positif ou avec le pôle négatif comme électrode différenciée. Le postulat serait plausible.

Mais, conformément aux théories anciennes sur l'excitation monopolaire de Baierlacher (4), Brenner (5), Erb, (6) qui s'accordent avec les recherches de Pflüger, j'ai montré en collaboration avec Henry Cardot (7) que à la fermeture, seules les cathodes sont excitantes, quelles que soient les densités relatives du courant au pôle positif et au pôle négatif; En conséquence, l'excitation dite de fermeture anodique (P F) est une excitation cathodique se produisant à une cathode diffuse quelque part sur le trajet des lignes de force qui relient les électrodes instrumentales. Donc, quand on recherche des seuils avec le pôle positif ou avec le pôle négatif, on ne caractérise pas deux excitabilités différentes du tissu à l'excitation cathodique, où à l'excitation anodique; on caractérise l'excitabilité de deux points différents du tissu à la même excitation, cathodique toujours. C'est dire que les différen-

(1) *Boudet de Paris*. Electricité médicale. Paris, Doin 1885, p. 66.

(2) *Charbonnel-Salle*. Bibliothèque. Ecole Hautes Etudes, Section des sciences naturelles, XXIV.

(3) *Courtade*. Archives de physiologie, 1890.

(4) *Baierlacher*. Zeitschrift für. ration. Medicin., 3^e série, V. 1859.

(5) *Brenner*. St-Petersburger medicinische Zeitschrift. III, 1862.

(6) *Erb*. Traité d'Electrothérapie, trad. française, Rueff, 1884, p. 73.

(7) *H. Cardot et H. Laugier*. Acad. des Sciences CLIV. 1912, p. 375. Soc. de Biol., 2 et 9 mars 1912. Journal de Physiologie et de Pathologie générale, mai 1912.

ces observées ne sont pas de différences d'action polaires mais des différences dans les conditions d'application de l'excitation cathodique. On peut affirmer en particulier que les différences du seuil observées tiennent pour une grande part à la différence dans un cas et dans l'autre entre la quantité d'électricité perdue dans les tissus, et la quantité utilisée pour l'excitation. Le point de départ de l'excitation étant certainement différent pour PF et pour NF, l'une de ces deux excitations se produisant à une cathode différenciée (NF) l'autre à une cathode diffuse (PF); on peut affirmer en toute certitude que n est différent dans les deux cas; le postulat critiqué est donc inadmissible.

Dans ces conditions, et pour les différentes raisons que nous venons d'exposer, on ne peut qu'abandonner la méthode proposée par l'éminent professeur de Lille, ainsi que son application à l'étude des excitabilités positive et négative et regretter que le Congrès de Barcelone ait cru devoir préconiser la méthode de Doumer.

Nous reproduisons ici les vœux émis par le congrès de Barcelone : Le congrès émet le vœu :

1°) Que dans toutes les recherches d'excitabilité il soit fait usage de la méthode des décharges de condensateurs comme étant la seule capable de donner des grandeurs vraiment caractéristiques de l'excitabilité, et en outre comparables entre elles.

2°) Que les expérimentateurs précisément dans le but d'obtenir cette comparabilité des résultats, veuillent bien s'astreindre à employer des électrodes ayant 100 cmc. de surface pour l'électrode indifférente et 1 cmc. pour l'électrode exploratrice.

3°) Qu'ils déterminent pour chaque pôle la constante de quantité β la constante d'intensité α et la consantante de temps τ

Les vœux 1 et 2 sont excellents; le vœu 3 ne peut être accepté en bloc : 1°) il sera bien entendu que en faisant les déterminations pour chaque pôle on ne caractérise pas d'excitabilité anodique et cathodique, du point moteur; mais l'excitabilité de deux points du

tissu à une même excitation (cathodique) se présentant au niveau des deux points avec des densités très différentes.

2°) La constante β n'a aucune signification physiologique; c'est un paramètre que l'on peut calculer pour la région de la loi des quantités qui se confond avec une droite, elle représente la valeur pour laquelle la loi, supposée linéaire coupe l'axe des ordonnées; mais à mesure que l'on fait des durées de passage plus courtes nous avons vu que les chiffres expérimentaux tombent au-dessous de la loi linéaire et que par conséquent la constante β perd toute valeur objective.

3°) On doit en effet calculer pour caractériser l'excitabilité d'un tissu, les valeurs de α et de τ ; mais il importe de faire table rase de la signification que Dummer attribue à cette « constante de temps » et de lui conserver la signification que lui ont donnée les travaux bien antérieurs que nous avons analysés (K. Lucas, M. et L. Lapicque), travaux auxquels Dummer évite de se référer.

Quant à la manière de déterminer la constante τ , au moyen des condensateurs, le procédé de choix est certainement celui indiqué par M. Lapicque pour l'obtention de la chronaxie par décharges de condensateur

On pourrait encore en obtenir un paramètre en faisant le rapport des quantités d'électricité liminaires pour 2 capacités différentes, à condition de choisir deux capacités convenables selon les règles que nous avons indiquées au chapitre « théorie des indices de vitesse (1) ».

(1) On obtiendrait ainsi un indice de vitesse analogue à celui que nous avons personnellement étudié dans cette thèse avec les ondes de la bobine d'induction. Nous avons choisi la bobine au lieu de condensateurs, parce que ces derniers demandent des voltages très élevés, dont tout le monde ne dispose pas, tandis que la bobine, véritable transformateur, permet d'obtenir sur le secondaire, des voltages excitants, pour une simple source de 4 volts dans le primaire.

Il est à souhaiter que le prochain congrès d'Electrologie, modifie en tenant compte de ces diverses observations les vœux, pour une part excellents mais pour une part regrettables qui ont été formulés à Barcelone.

E. Reiss (1), dans un ouvrage récent, où il essaie d'expliquer les faits de l'électrodiagnostic au moyen des données récentes de l'électrophysiologie, et particulièrement au moyen de l'hypothèse de Nernst, expose quelques recherches qui se rapportent directement au sujet qui nous occupe. Nous devons les relater ici.

Rappelons d'abord quelques notions antérieurement exposées : nous avons montré que les deux notions de vitesse d'excitabilité et de pente limite sont intimement liées l'une à l'autre, et qu'elles mesurent en somme la même propriété physiologique du tissu. Plus un tissu est rapide (grande vitesse d'excitabilité) plus il est difficilement excitable par les courants lentement croissants, plus est abrupte la pente limite qui permet encore de l'exciter. C'est dire que si l'on apprécie l'excitabilité relative de différents tissus aux courants progressifs, on apprécie par là même, d'une façon qualitative leurs paramètres chronologiques relatifs.

Or, avec des vues théoriques sur la nature de l'hyperexcitabilité galvanique, que nous ne pouvons discuter ici, Reiss, a essayé de déterminer chez l'homme l'excitabilité relative de muscles normaux et de muscles dégénérés, aux courants lentement croissants.

Pour cela il a étudié, des cas de paralysies périphériques unilatérale, s'accompagnant de réaction de dégénérescence; et il a mesuré, sur le muscle dégénéré présentant de l'hyperexcitabilité galvanique, et sur le muscle symétrique resté normal, quelles étaient les intensités qu'il fallait atteindre pour obtenir le seuil de

(1) E. Reiss. Die Entartungsreaction. Berlin, 1912.

l'excitation, suivant que l'on employait des courants à début brusque, instantanés, ou des courants progressifs.

Certes, la méthode qu'il emploie est fort insuffisante et imprécise : il obtient des courants lentement croissants, soit en déplaçant à la main la manette d'un rhéocorde de contact à contact, soit en déplaçant un curseur sur une résistance métallique, ou liquide; or, la première méthode donne non des courants à pente régulièrement croissante, mais des courants en escalier, et la deuxième ne donne des pentes régulières, qu'à une seule condition, c'est que les curseurs soient entraînés d'un mouvement uniforme, par des appareils mécaniques bien réglés. Aussi ces expériences ne permettent de mesurer d'une façon précise, ni la vitesse d'excitabilité des tissus, ni le rapport d'efficacité relative des courants lentement croissants, ni la pente limite pour la mise en jeu des différents tissus; elles ne permettent qu'une appréciation qualitative du sens dans lequel varient ces différents facteurs, au cours des dégénérescences. C'est en cela qu'elles nous intéressent.

Reiss a constaté dans tous les cas qu'il a étudiés que le muscle dégénéré est beaucoup plus facilement excitable par les courants lentement progressifs que le muscle normal; sur ce dernier, à condition d'introduire le courant progressivement, on peut atteindre l'intensité limite que le sujet peut tolérer, sans produire de contraction; sur le muscle fortement dégénéré ce n'est pas possible; « die mitgeteilten Fälle zeigen übereinstimmend, dass man in den entarteten Muskel den galvanischen Strom nicht einschleichen kann » (p. 50).

L'auteur a étudié plusieurs cas, (paralysie faciale périphérique, paralysie d'Erb, paralysie du plexus brachial due à des métastases sarcomateuses, polynévrites alcooliques, etc.). Nous ne voulons pas relever ici, ni les observations ni tous les chiffres que donne l'auteur : citons seulement une série de chiffres d'une observation typique.

Observation. — Paralyse faciale périphérique gauche, avec inexcitabilité galvanique et faradique du nerf, lenteur de la contraction, inversion polaire et hyperexcitabilité galvanique du muscle.

Sur l'orbiculaire des lèvres, à droite, (côté sain), le courant galvanique à début brusque provoque une contraction à 3 *milliampères*; lorsque le courant atteint une intensité de 20 *milliampères* en 9 secondes (courant progressif) on n'obtient aucune contraction.

Sur l'orbiculaire des lèvres, à gauche (côté dégénéré) le courant galvanique à début brusque provoque une contraction à 0,8 *milliampère* (hyperexcitabilité galvanique); lorsque le courant s'établit progressivement on obtient une contraction avec un courant qui atteint l'intensité de 1.2 *milliampère* en 32 secondes. On voit que dans ce cas, un courant qui s'établit d'une façon *extrêmement lente* est à peine moins efficace que le courant à début brusque.

Reiss donne plusieurs séries de chiffres sur différents autres cas qui montrent le même phénomène; sans qu'il soit possible de préciser davantage, on peut tirer de ces expériences cette conclusion que au cours des dégénérescences la vitesse d'excitabilité des muscles diminue.

Enfin, Passler (1) a signalé sans y insister des faits analogues, sur des cas de réaction myotonique; il a observé sur deux sujets, présentant une myotonie atrophique, que les muscles présentant la réaction myotonique réagissaient bien lorsque le courant leur était amené d'une façon lente et progressive.

Nous devons citer en terminant cet historique les différentes recherches dans lesquelles Cluzet (2) s'est pro-

(1) *Pässler*. Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten. Berlin, 1906. Bd 442. Heft 3 (1088-1091). Zur Frage nach dem Wesen der Entartungsreaction.

(2) *J. Cluzet*. Comptes rendus de la Soc. de Biol., 9 nov. 1901.
Comptes rendus de la Soc. de Biol., 18 janv. 1902.

Annales d'Electrobiologie, 1903, p. 697.

Loi d'Excitation par décharges de condensateur. Thèse de la Fac. des Sciences de Paris, 1905.

Annales d'Electrobiologie, mai 1906.

Comptes rendus de la Société de Biologie, 23 fév. 1907.

Comptes rendus de la Société de Biologie, 23 mars 1907.

posé de mesurer la constante de temps soit sur l'homme normal, soit sur des muscles en état de dégénérescence. D'autre part, il a fait des déterminations en utilisant les décharges de condensateur, et en leur appliquant la loi de Weiss.

$$Q = a + b t$$

en faisant l'hypothèse que pour des condensateurs de capacité respective 1, 2, 5, 10, 15 et 20, les durées des ondes efficaces sont respectivement comme 1, 2, 5, 10, 15 et 20.

Dans ces conditions, il a trouvé que la loi s'appliquait d'une façon satisfaisante à l'homme. En outre, calculant les coefficients a et b , aux moyens des déterminations effectuées avec les condensateurs de capacité 1 et 20, il a montré que :

1°) Après destruction de la moelle le rapport $\frac{a}{b}$ prend des valeurs plus petites qu'à l'état normal.

2°) Après injection de curare, le rapport $\frac{a}{b}$ augmente considérablement à mesure que l'on se rapproche de l'inexcitabilité finale.

D'autre part, utilisant la loi qu'il a donnée ultérieurement de l'excitation des nerfs et des muscles par décharges de condensateur, à savoir :

$$C (V_0 - b R) = a + b R C L \frac{V_0}{b R}$$

il a déterminé dans ces conditions la valeur du rapport $\frac{a}{b}$ qu'il considère effectivement comme représentant une durée caractéristique de l'excitabilité du tissu considéré.

Il trouve que $\frac{a}{b}$ est de 0 seconde 0002 sur le nerf médian de l'homme, et que $\frac{a}{b}$ est de 0.0007 à 0.0008 sur les nerfs sciatiques de grenouilles étudiées; il conclut, d'autre part, de chiffres expérimentaux obtenus par Waller, que $\frac{a}{b}$ est égal à 0.0004 sur le nerf sciatique du chat.

En outre étudiant dans un certain nombre de cas pathologiques la formule d'excitation des nerfs et des muscles, il a montré que le rapport $\frac{a}{b}$ varie : il a étudié les cas suivants : atrophie musculaire par inactivité fonctionnelle, hémiplegie, paralysie faciale, paralysie saturnine, paralysie faciale périphérique, paralysie infantile. Dans les cas où l'excitabilité galvanique et faradique est normale $\frac{a}{b}$ est égal à 2.5/10.000 de seconde. — Dans les cas d'hyperexcitabilité galvanique et faradique $\frac{a}{b}$ est égal à 0.8-2/10.000 de seconde. Dans les cas d'hypo ou d'inexcitabilité faradique, avec hyperexcitabilité galvanique $\frac{a}{b}$ est égal à 34.162/10.000 de seconde; dans les cas d'hyperexcitabilité galvanique avec inexcitabilité faradique, $\frac{a}{b}$ prend des valeurs de 21-121/10.000 de seconde.

Remarquons que dans ces expériences $\frac{a}{b}$ représente « la durée de l'excitation de la décharge correspondant au minimum d'énergie totale; la durée d'excitation correspondant au minimum d'énergie utilisée à pour valeur 1,267 $\frac{a}{b}$ ». Cluzet considère comme caractéristique de l'excitabilité du tissu, non pas la capacité produisant le seuil en dépensant le minimum d'énergie, non pas même la durée de cette décharge; — mais bien la durée d'excitation de cette décharge, c'est-à-dire la durée physiologiquement utile. On sait que dans toute décharge de condensateur, qui rejoint asymptotiquement la ligne de zéro, existe une queue de décharge inutile, que l'on peut couper sans atténuer l'efficacité de la décharge; $\frac{a}{b}$ est ici la durée physiologiquement active (durée d'excitation) de la décharge, produisant le seuil avec le minimum d'énergie.

Mais dans l'appréciation de cette durée d'excitation entrent des conceptions théoriques et des interprétations de faits expérimentaux qui ont été critiquées et qui ont donné lieu à de longues et vives discussions

dans lesquelles il ne nous est pas possible d'entrer. Cluzet pense en effet que « la durée de la partie active ou « durée de l'excitation est égale à $RCL \frac{V_0}{bR}$; la « décharge commençant à devenir inactive quand le « potentiel atteint la valeur bR . Ce potentiel inactif « est donc le même pour toutes les capacités employées, il ne dépend que de l'excitabilité du nerf et « de la résistance du circuit de décharge. »

Il ne nous est pas possible d'exposer ici les recherches qui ont été faites pour déterminer la durée utile des décharges de condensateur; on trouvera les éléments de la discussion dans les travaux de Cluzet déjà cités et dans les notes de L. Lapique dont nous donnons ci-dessous la bibliographie.

Ultérieurement au *congrès de Barcelone* (1911). Cluzet a donné une méthode utilisable en clinique pour déterminer au moyen de 4 condensateurs de capacité différente les constantes de la loi d'excitation et en particulier la valeur de $\frac{a}{b}$.

Remarquons avant de terminer cet exposé, forcément court, des recherches effectuées en vue de déterminer les paramètres chronologiques de l'excitation sur l'homme, à l'état normal ou pathologique, que la partie la meilleure et la plus instructive de l'électrodiagnostic, à savoir la comparaison de l'excitabilité galvanique et de l'excitabilité faradique, représente une appréciation qualitative grossière de la vitesse d'excitabilité du tissu. En effet : les chocs d'induction représentent des ondes brèves, les courants galvaniques des ondes de longue durée. Dire que l'excitabilité galvanique a augmenté, et que l'excitabilité faradique a diminué dans certains cas de dégénérescence c'est dire que la constante de temps a augmenté, que le muscle, plus sensible aux ondes de longue durée, et moins sensible aux ondes brèves, s'est notablement ralenti.

(1) L. Lapique. Soc. de Biologie, 1^{er} juillet 1905. 27 avril 1907. 4 mai 1907. 25 mai 1907. 8 juin 1907.

Soit en effet, un muscle normal dont l'excitabilité est caractérisée par la loi.

$$Q = A (t + \tau)$$

Fig. 14 droite AA'

Supposons que sous une influence pathologique il devienne hyperexcitable aux ondes de longue durée, et hypoexcitable aux ondes brèves, sa loi d'excitation sera représentée par une droite différente BB' qui sera au-dessous de la droite AA' pour les ondes de longue durée et au-dessus de cette droite pour les ondes brèves.

Il est facile de voir que, dans ces conditions la droite BB' coupera l'axe des x en un point B' tel que $OB' > OA'$; or nous avons montré que OA' et OB' représentent les valeurs de τ pour chacune des deux lois d'excitation; on voit que dans le second cas, τ a augmenté, le tissu s'est ralenti, et sa vitesse d'excitabilité a diminué.

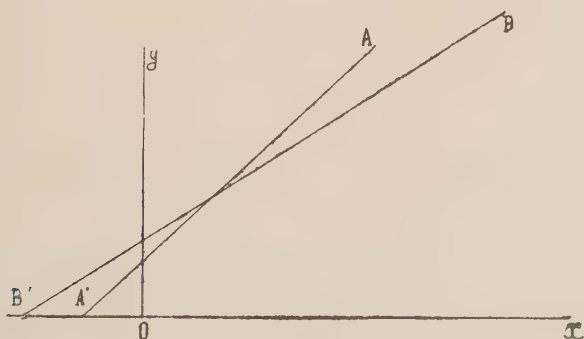


Fig. 14

On voit que cette comparaison, quoique restant purement qualitative, et n'ayant pas la valeur d'une mesure, indique cependant le sens de variation du paramètre chronologique, et est de ce fait intéressant et utile; mais on aperçoit, aussi combien son application, est d'un domaine limité. Dès qu'il y a hyperexcitabilité galvanique et hyperexcitabilité faradique, il n'est plus

possible de rien prévoir (fig. 15); les deux droites BB' et CC' correspondent par rapport à l'excitabilité initiale AA' la première à une vitesse d'excitabilité diminuée, à un tissu ralenti, ($OB' > OA'$) et la seconde à une vitesse d'excitabilité augmentée, à un tissu plus rapide ($OC' > OA'$). — Cependant elles manifestent toutes deux une double hyperexcitabilité, galvanique et faradique.

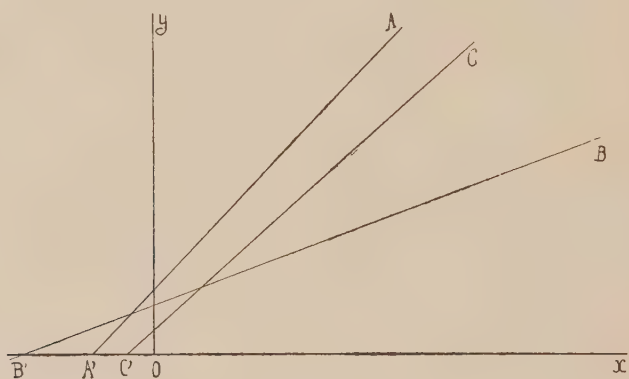


Fig. 15

De même lorsque l'examen révèle une hypoexcitabilité galvanique et faradique on ne peut rien affirmer. On voit que seules des mesures quantitatives exactes permettront d'obtenir dans tous les cas des renseignements sur la variation de la vitesse d'excitabilité. Néanmoins, il était intéressant de montrer que ce qu'il y a de meilleur dans l'électrodiagnostic, repose sur la notion de variation de la vitesse d'excitabilité des tissus au cours des dégénérescences.

CHAPITRE 11.

Technique : I. Dispositif instrumental.

Nous avons utilisé pour ces recherches, le chariot de Tripier, actuellement en service dans un grand nombre de services d'électrothérapie, chariot qui ne diffère guère que par des détails de construction, mais nullement dans son principe du chariot à glissière de Du Bois Reymond.

A. Le circuit primaire. - Les interrupteurs

Une bobine primaire fixe (résistance 2 ohms) est parcourue par un courant inducteur (force électro-motrice 4 volts, dans nos expériences, fournie par deux accumulateurs à larges plaques, à résistance intérieure très faible) Un dispositif de balancier automatique, et un trembleur, permettent de faire des interruptions rythmées suivant une échelle de rythmes très étendue : nous n'insisterons pas autrement sur ce dispositif d'interruptions automatiques, car il n'a pas servi au cours de ces expériences; nous n'avons fait que des interruptions isolées, à la main.

Comme un interrupteur à main, nous avons utilisé successivement différents dispositifs : les chariots portent généralement une pédale, disposée sur le circuit primaire; quand on appuie sur la pédale, le circuit primaire se ferme; quand on l'abandonne à elle-même, l'élasticité de la lame de cuivre qui la constitue la ramène à sa position de repos; le courant s'ouvre. — Nous avons utilisé d'abord cette pédale; il est facile de voir que, si l'on veut obtenir des résultats physiologiques constants, il faut que ces fermetures et surtout ces ouvertures soient faites de façon extrêmement régulière; nous l'avons dit, la durée des périodes variables du courant primaire est le facteur essentiel qui condi-

tionne l'efficacité relative des deux ondes induites; il faut donc que toutes les ouvertures se fassent avec la même brusquerie, et pour cela il faut lâcher la pédale d'un mouvement extrêmement brusque, et ne jamais l'accompagner dans son mouvement de retour à sa position de repos. Nous sommes arrivés ainsi à obtenir des résultats très constants; en s'efforçant de conserver à l'ouverture sa rapidité maxima, on obtient des seuils d'ouverture très stables. Mais il faut bien savoir que, l'influence de la durée sur l'efficacité d'une onde est telle, que si l'on ne prend pas cette précaution on risque d'avoir, toutes choses étant égales d'ailleurs, des seuils d'ouverture très variables, correspondant pour des rapidités d'ouverture différentes à des quantités variant facilement du simple au double.

Nous avons également utilisé un deuxième interrupteur, constitué simplement par une pointe de cuivre maniée à la main et fermant le courant dans un godet de mercure. Ici encore, l'efficacité relative des deux ondes dépend beaucoup de la manière dont on fait les interruptions; pour obtenir une bonne constance des seuils, il faut faire des ouvertures, aussi rapides que possible, en s'efforçant de retirer la pointe métallique avec le maximum de vitesse réalisable à la main; nous avons pu obtenir ainsi des résultats très satisfaisants, comme stabilité et comme constance.

Enfin pour diminuer au maximum les variations produites soit par la fatigue soit par l'inattention de l'opérateur, nous avons utilisé un troisième interrupteur mécanique, dans lequel, l'ouverture est effectuée par l'action d'un ressort qui se détend en toute liberté: (fig. 16). Une tige métallique M porte à son extrémité inférieure une pointe de cuivre B; quand on appuie verticalement sur cette tige, elle prend la position représentée dans la figure; le circuit primaire se trouve fermé du fait que la pointe B plonge dans le godet de mercure C; le petit cliquet D, vient s'accrocher sous la pièce métallique E; le ressort R est mis en tension. La pièce métallique E étant mobile autour de l'axe O, quand on appuie dans le sens de la flèche sur son extré-

mité F, le cliquet D se trouve libéré, et aussitôt sous l'influence du ressort antagoniste, la tige métallique AB, revient à sa position première, avec une vitesse

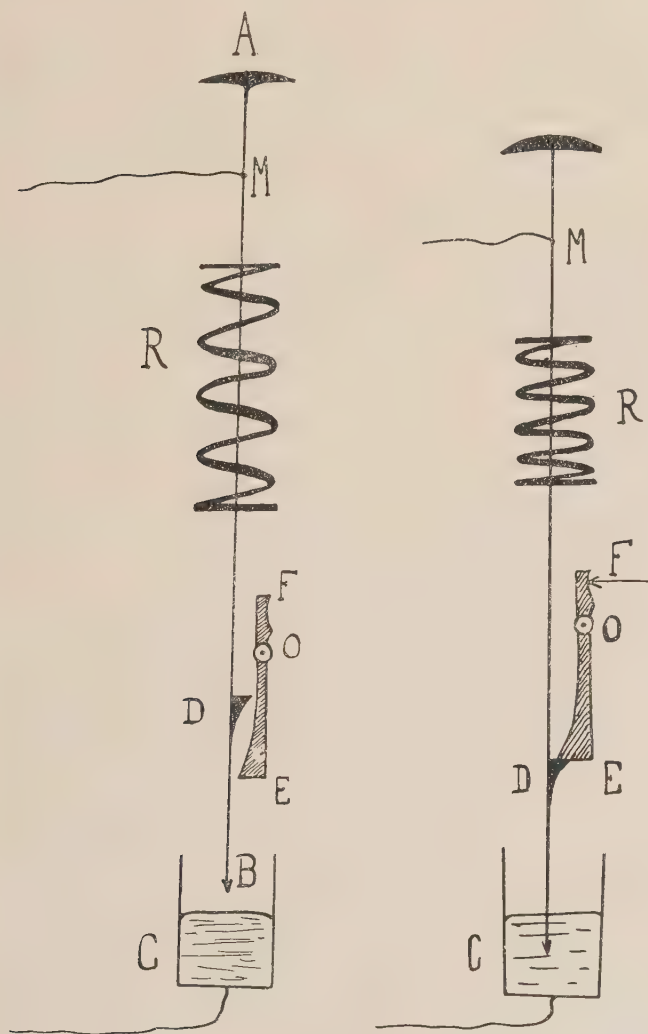


Fig. 16

considérable et le circuit s'ouvre, au milieu de la course du ressort par rupture du contact cuivre mercure; une étincelle a lieu, mais la coupure est shuntée par un condensateur qui éteint l'étincelle. Ce dis-

positif d'interrupteur donne des seuils d'ouverture très constants, et aussi très bas, car la rapidité, et par conséquent l'efficacité de l'onde induite d'ouverture, est beaucoup plus grande qu'avec les autres modes d'interruption.

Remarquons, que, lorsqu'on change le mode d'interruption sur le circuit primaire, le seuil qui varie surtout est le seuil d'ouverture; tandis qu'il prend des valeurs, très différentes suivant que la rupture est faite avec une pédale ou un interrupteur à mercure à main, le seuil de fermeture varie extrêmement peu; c'est un fait qui résulte très nettement des essais que nous avons faits au moyen des différents dispositifs décrits; j'en donnerai seulement un exemple :

2 fév. 1912. — M. Eh (sujet sain). — Biceps droit. Point moteur inférieur. Bobine de 2.500 ohms.

INTERRUPTIONS FAITES AU MOYEN DE :	SEUILS (distance en centimètres)		QUANTITÉS (1) CORRESPONDANTES	
	F.	O.	F.	O.
Une pédale à main	7 cm.	13 cm. 5	193	27.2
Autre pédale à main	7 cm.	15 cm. 1/4	193	16.32
Interruptions à la main dans le mercure.	7 cm.	16 cm. 5/8	193	11.17

On voit que ces différents modes d'interruptions ont laissé ici le seuil de fermeture, complètement inchangé, tandis que le seuil d'ouverture est passé de 27,2 à 11,7.

Ce fait expérimental certain peut être expliqué par deux considérations théoriques.

1°) Il est vraisemblable que, la durée de la période variable de fermeture n'est que fort peu influencée par le mode d'interruption, elle dépend essentiellement des conditions de self induction et de résistance ohmique du circuit primaire.

2°) La durée de l'onde de fermeture étant considérablement plus grande que celle de l'ouverture, on appro-

(1) Pour la graduation des bobines en quantité, voir à l'appendice.

che sans doute des durées, où l'influence du temps devient négligeable; nous savons que pour des durées très grandes, l'intensité linéaire ne varie plus avec la durée; il est certain que l'onde de fermeture doit sinon attendre ces durées, tout au moins s'en rapprocher beaucoup. Ceci explique que la technique d'interruptions agisse considérablement sur l'ouverture et n'agisse que peu ou pas sur la fermeture.

B. Le circuit secondaire

Le circuit secondaire est constitué par la bobine secondaire, les électrodes, le corps humain, et un interrupteur. Les électrodes sont les électrodes habituellement employées en électrodiagnostic : 1°) une large électrode que l'on place dans le dos du sujet, constituée par un système : plaque d'étain, feutre, peau de chamois mouillés ; 2°) un bouton de charbon recouvert d'une peau de chamois mouillée, et qui fait électrode différenciée au point moteur du muscle ou du nerf étudiés.

Remarquons, que le circuit extérieur doit toujours comporter une résistance assez grande; c'est une condition indispensable à l'utilisation des courants induits; en effet, le rapport de durée des deux ondes induites dépend essentiellement, nous l'avons montré, du rapport de durée des deux phénomènes qui sont leur origine : période variable de la fermeture, période variable de l'ouverture, dans le circuit primaire, — mais la forme même de ces ondes induites de fermeture et d'ouverture, dépend aussi, de la nature du circuit où elles se développent, et essentiellement du rapport de la self induction à la résistance ohmique de ce circuit; le retard à l'établissement d'un courant dans un circuit métallique varie en raison directe de la self induction, et en raison inverse de la résistance ohmique; plus le rapport $\frac{L}{R}$ est petit, plus le retard à l'établissement des ondes induites est faible; quand $\frac{L}{R}$ devient très petit le rapport de durée des deux ondes et par con-

séquent le rapport de leur efficacité physiologique, deviennent de plus en plus indépendants des caractéristiques physiques du circuit secondaire; on voit que pour obtenir des résultats, constants et stables, il faut diminuer autant que possible $\frac{L}{R}$ et pour cela avoir un circuit extérieur à forte résistance ohmique R .

II. Technique d'une détermination.

S'agissant de déterminer le rapport des quantités d'électricité liminaires à l'onde de fermeture et à l'onde d'ouverture du courant induit, la condition essentielle à réaliser est que les deux excitations se produisent bien au même point du tissu : pour cela il faut :

1°) Faire les deux déterminations en *courant descendant*, de façon à ce que, tant pour l'onde de fermeture que pour l'onde d'ouverture, l'électrode différenciée soit négative, et que l'excitation y naisse. Il faut donc inverser le courant entre les déterminations du seuil de fermeture et du seuil d'ouverture.

2°) Il faut, précaution essentielle, et souvent difficile à réaliser, conserver l'électrode exactement au même point, pour faire les deux déterminations; cette condition est particulièrement délicate à réaliser lorsque l'on fait des déterminations, non pas en plein muscle, mais au niveau de points moteurs très délicats, où un très léger déplacement de l'électrode, peut correspondre à des variations quantitatives des seuils très considérables; il est bien évident que si l'électrode s'est légèrement déplacée entre les deux déterminations et si l'on mesure les seuils dans des conditions d'efficacité différentes de l'électrode différenciée, le rapport des quantités n'a plus aucune signification physiologique.

Enfin, pour qu'une détermination soit bonne il faut qu'elle soit faite dans des conditions de complète résolution musculaire; Schott (1) a montré que l'efficacité

(1) J. Schott (loc. cit.).

physiologique relative des ondes varie considérablement suivant l'état de tension où se trouve le muscle étudié; on observe un phénomène analogue quand le relâchement du muscle varie; si le malade se raidit on observe généralement une diminution dans la différence d'efficacité des deux ondes; l'indice de vitesse diminue; pour obtenir des résultats comparables il faut donc veiller à obtenir une résolution aussi complète que possible.

Le muscle étant donc dans la résolution la plus grande possible, on recherche d'abord le seuil à l'onde d'ouverture, l'électrode différenciée étant négative. Puis on inverse le sens du courant primaire et on rapproche les bobines jusqu'à ce que l'on trouve le seuil de fermeture; mais ce seuil de fermeture se produisant à des niveaux où l'onde d'ouverture produit des excitations maximales, et douloureuses pour le sujet, il faut empêcher les ondes d'ouverture de passer; il suffit pour cela, quand on recherche le seuil de fermeture d'ouvrir le circuit secondaire, avant le passage de l'onde d'ouverture.

On obtient ainsi les seuils (distances en centimètres) aux ondes de fermeture et d'ouverture. On cherche sur les tableaux de graduation, les quantités correspondantes et on fait leur quotient. On a ainsi *l'indice de vitesse du tissu étudié*, au point excité.

CHAPITRE III.

Résultats obtenus sur des muscles normaux

En utilisant la méthode décrite, et en tenant compte minutieusement des différentes précautions indiquées, nous avons d'abord étudié des muscles sains, sur des sujets normaux, ou atteints d'affections manifestement unilatérales.

Si l'on fait donc sur un muscle d'un homme normal, des déterminations successives, l'électrode négative étant au point moteur, on constate que le rapport des quantités d'électricités liminaires à l'onde de fermeture et à l'onde d'ouverture, reste constant, à une excellente approximation.

Exemple. 8 avril 1911. Madame V... infirmière, bien portante : Biceps droit, bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCE en cm.		SEUILS en quantité		INDICE de vitesse
	F.	O.	F.	O.	
1 ^{re} détermination	8.5	15.5	215	20	10.8
2 ^e détermination	8	15	256	22.5	11.4

Des déterminations effectuées à de longs intervalles (plusieurs jours, ou plusieurs semaines) donnent un résultat également constant :

Exemple. 20 avril 1911. — Même sujet, même muscle, même bobine.

DISTANCE en cm.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE DE VITESSE
F.	O.	F.	O.	
8.75	18	133	11.5	11.5

D'autre part, si l'on compare, chez différents individus, l'indice de vitesse d'un même muscle, on trouve, que cet indice varie extrêmement peu. Voici par exemple l'indice de vitesse du biceps droit de deux sujets normaux :

Exemples. 27 avril 1911. Monsieur R... fils, bien portant, boxeur de profession; bobine de 3.390 ohms.

DISTANCE en cm.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE DE VITESSE
F.	O.	F.	O.	
9.75	18.25	133	11	12.1

22 avril 1911. — Monsieur R... père, bien portant, boxeur de profession. Biceps droit. Bobine de 3.390 ohms.

DISTANCE en cm.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
5.5	13.5	446	36	12.4

14 juin 1911. Monsieur M... Membre supérieur droit normal; entre à l'hôpital pour un coup de feu ayant atteint le bras gauche : Biceps droit. Bobine de 3.390 ohms.

DISTANCE en cm.		SEUILS EN QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
10.5	19 1/4	104	9	11.6
10.5	19	104	9.5	10.9

Si l'on examine systématiquement les muscles biceps droits et gauches chez les différents sujets normaux, on constate qu'il est impossible de déceler une différence systématique d'indice entre les deux côtés : — Voici les chiffres correspondant aux biceps gauche de M. V... M. R... père, et M. R... fils, dont les biceps droits viennent d'être étudiés.

8 avril 1911. Madame V... Biceps gauche. Bobine de 3.390 ohms.

DISTANCE en cm.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
8.5	15.75	215	18.75	11.5
5.5	13.5	446	36	12.4

25 avril 1911. Monsieur R... père. Biceps gauche. Bobine de 3.390 ohms.

DISTANCE en cm.		SEUILS EN QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
6.75	14.25	347	28	12.4
7.25	14.75	310	24	12.9

27 avril 1911. Monsieur R... fils. Biceps gauche.
Bobine de 3.390 ohms.

DISTANCE en cm.		SEUIL. EN QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
9.75	18.5	133	10.5	12.6

On voit donc par les chiffres que nous venons de donner, *que pour le biceps chez différents sujets, à droite et à gauche, à de longs intervalles de temps, l'indice de vitesse est remarquablement constant*, pour une instrumentation déterminée, cela va de soi.

Remarquons en passant, que sur ces sujets, normaux, les seuils de fermeture en quantité pour le biceps ont oscillé entre 104, chiffre minimum et 446 chiffre maximum; les seuils d'ouverture ont varié entre 9 et 36, chiffres minimum et maximum; or ces muscles sont tous des muscles normaux, en parfait état physiologique; on voit combien il est difficile d'essayer de caractériser l'excitabilité réelle d'un tissu par une simple hauteur de seuil, et combien cette dernière notion est sous la dépendance des contingences expérimentales. Pour ces déterminations successives au contraire l'indice de vitesse, s'est montré très nettement indépendant des circonstances puisqu'il a varié seulement de 10,8 à 12,9, apparaissant ainsi comme une caractéristique très objective de l'excitabilité d'un tissu (1).

(1) Notons toutefois que si la grande stabilité de l'indice de vitesse, conditionne sa valeur comme paramètre caractéristique de l'excitation, l'intérêt qui s'attache à sa détermination ne tient pas à sa constance, plus grande que la hauteur des seuils. — Son intérêt essentiel, est qu'il atteint un facteur de l'excitabilité autre que la hauteur de seuil; les deux notions sont aussi différentes que le sont pour un train rapide la notion force de démarrage, et la notion vitesse de démarrage; quand bien même l'une de ces notions se prêterait à une mesure très exacte, l'autre n'en devrait pas moins être déterminée si l'on voulait avoir une idée complète de la valeur fonctionnelle du train rapide; c'est pourquoi je dis que l'intérêt qui s'attache à la détermination de l'indice de vitesse ne tient pas à sa constance plus grande que la hauteur des seuils; quand bien même cette dernière pourrait être mesurée d'une manière objective, constante et précise, la détermination de l'indice de vitesse n'en devrait pas moins être faite.

Quel est l'indice de vitesse des différents muscles chez l'homme?

On sait que chez les invertébrés, écrevisse par exemple) et chez les vertébrés où la question a été étudiée (grenouille), la vitesse d'excitabilité n'est pas la même chez les différents muscles du corps; naturellement si l'on compare des muscles lisses et des muscles striés, on trouve de très grandes différences de rapidité; mais entre les différents muscles striés eux-mêmes on trouve des différences très nettes et très considérables.

C'est aussi par exemple que le gastrocnémien de *Rana esculenta* présente une chronaxie d'environ. 0 sec. 0003, tandis que le droit antérieur de l'abdomen, à une chronaxie de 0 sec. 0009. — De même chez l'écrevisse, le muscle adducteur de la pince a une chronaxie beaucoup plus grande que le muscle fléchisseur de la queue.

Et l'on sait que ces différences de paramètre chronologique, traduisent dans la catégorie excitation, les différences qui existent dans ces tissus au point de vue de la durée de leur contraction. On sait en effet (Cash) (1), que les formes de contraction des différents muscles striés de la grenouille sont très nettement différentes les unes des autres, et correspondent à des adaptations fonctionnelles variées.

Nous nous sommes demandé s'il en est de même chez l'homme et nous avons recherché si l'on obtient sur les différents muscles de l'homme des indices de vitesse différents.

Sur plusieurs sujets nous avons recherché systématiquement l'indice de vitesse pour les muscles suivants : Biceps, deltoïde, jambier antérieur, extenseur commun des orteils, extenseur commun des doigts, orbiculaire des lèvres. Voici quelques-unes des valeurs trouvées. (Bobine de 3.390 ohms).

(1) Cash. Der Zuckungsverlauf als Merkmal der Muskelart (Archiv. für Anat. und Physiologie, 1880, p. 147).

1°) Biceps. (Voir chiffres ci-dessus).

2°) Deltoïde.

	SEUILS (distances en cm)		SEUILS (en quantités)		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
M. R... père (à droite)	5.5	13.25	446	39	11.4
id. (à gauche)	5.5	13.50	446	36	12.4
M. R... fils (à droite)	6	13.75	410	33	12.4
id. (à gauche)	4.5	12.5	535	52	10.3
id. id.	3.75	12.5	596	52	11.4
M ^{me} V... (à gauche)	7	13.75	330	33	10

3°) Long supinateur.

M ^{me} V... (à droite)	6	13.5	410	36	11.4
id. (à gauche)	8	15.5	256	20	12.8

4°) Extenseur commun des doigts.

M. R... père (à droite)	4.5	12.5	535	52	10.3
id. id.	4	12.25	582	57	10.2
id. (à gauche)	3	11.75	665	67	9.9
id. id.	2.75	11.75	676	67	10.1

5°) Droit antérieur de l'abdomen.

M. R... fils (à droite)	5.5	13	446	42	10.6
-------------------------	-----	----	-----	----	------

6°) Orbiculaire supérieur des paupières.

M. R... père (à droite)	9.5	17.75	145	12	12.1
-------------------------	-----	-------	-----	----	------

7°) Extenseur commun des orteils.

M. R... fils (à droite)	2.5	11.75	710	67	10.6
	2	11.75	762	67	11.3
id. (à gauche)	0	11.25	900	81	11.1
	1	11.50	860	74	11.6

8°) Jambier antérieur.

M. R... père (à droite)	2.25	12.75	736	67	11
id. id.	2	11.75	762	67	11.4
id. (à gauche)	2.75	12	688	62	11.1
id. id.	3	12	665	62	10.6
M. R... fils (à droite)	0	11.5	900	74	12.1
id. id.	2.25	11.5	736	74	9.9
id. (à gauche)	2.5	11.5	710	74	9.6
id. id.	2.25	11.5	736	74	9.9

9°) Orbiculaire des lèvres.

a). M. Ros.. (Paralysie faciale gauche). Examen du muscle à droite.	5.875	13.5	418	36	11.6
b) M ^{lle} E... (Paralysie faciale droite). Examen du muscle à gauche.	6.875	14.125	338	29	11.6
	7 1/8	14 1/2	320	26	12.3

10°) Frontal.

a) M ^{lle} E... (Paralysie faciale droite). Examen du muscle à gauche.	8	15.75	256	18.75	13.6
	8.25	16	235	17.5	13.3
b) M ^{lle} N... (Paralysie faciale droite). Examen du muscle à gauche.	8	15 3/4	256	18.75	13.6

En résumé on voit que l'indice de vitesse accuse entre les muscles de l'homme normal des différences de rapidité beaucoup moins accusées que celles qui ont été signalées sur les muscles des invertébrés, ou des vertébrés inférieurs. Cependant, de petites différences se manifestent entre les muscles, qui dépassent les limites des variations habituelles pour un même muscle.

Si nous prenons, sur l'ensemble des déterminations faites, des moyennes nous trouvons que les muscles se rangent de la façon suivante.

VALEUR MOYENNE DE L'INDICE (Robine de 3390 ohms)

Biceps	12.3
Delhoide	11.4
Orbiculaire des lèvres	12
Frontal	13.1
Long supinateur	11.8
Extenseur commun des doigts	10.2
Droit antérieur de l'abdomen	10.5
Jambier antérieur	10.5

Somme toute, ce sont là des indices très voisins, et il faut tirer de ces chiffres la simple indication suivante que l'ensemble des muscles de l'homme possède un indice de vitesse sensiblement constant, qui pour l'instrumentation employée est voisin de 11-12; parmi les muscles étudiés, seuls le jambier antérieur, le droit antérieur de l'abdomen, l'extenseur des doigts ont une vitesse un peu plus faible.

Il est probable que ces différences d'indice qui dépassent nettement, mais peu, les limites de variation, qui sont habituelles pour un même muscle, doivent correspondre à des différences de vitesse d'excitabilité très faibles. Nous savons en effet (voir plus haut : théorie des indices de vitesse et plus loin : critique de la méthode) que l'indice de vitesse ne traduit pas avec la même sensibilité à tous les niveaux, les variations de la vitesse d'excitabilité; or, nous sommes ici dans la zone où de grandes variations d'indice traduisent de petites variations de la vitesse d'excitabilité (zone des petites chronaxies, où l'indice est voisin du rapport de durée des deux ondes induites de fermeture et d'ouverture). C'est dire qu'une variation d'indice de 10 à 12, correspond à une variation infiniment moins grande de la chronaxie qu'une variation d'indice de 4 à 2. — En somme, vis-à-vis des variations de vitesse que nous verrons prendre naissance chez les muscles en voie de dégénérescence, on peut dire que les différences de vitesse, chez les muscles normaux de l'homme sain sont extrêmement petites.

Remarques sur l'efficacité relative de diverses bobines secondaires.

Nous avons eu l'occasion, au cours de ces recherches d'utiliser diverses bobines secondaires, la bobine primaire, restant dans tous les cas complètement inchangée.

Or j'ai montré (page 64) que les modifications des caractéristiques physiques du circuit secondaire, agissent sur la durée absolue des ondes de fermeture et d'ouverture, et aussi sur leur durée relative; il était donc à prévoir que les modifications du secondaire agiraient sur l'indice de vitesse. C'est ce qu'il est facile de vérifier.

Avec chaque bobine utilisée on obtient un indice de vitesse différent; et pour chaque muscle, chaque tissu, l'indice de vitesse correspondant à chaque bobine conserve une excellente constance.

Exemple : La bobine de 3390 ohms, dont nous avons précédemment étudié les effets physiologiques était faite de deux portions concentriques l'une de 1651 ohms, l'autre de 1731 ohms, superposées, que l'on pouvait prendre, d'une façon isolée, ou que l'on pouvait totaliser.

Voici par exemple une série de chiffres obtenus avec la bobine de 1651 ohms, sur des muscles biceps, droits et gauches, de sujets normaux.

8 avril 1911. M. V. (Biceps droit).

DISTANCE EN CM.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
7	15	187	11	17

22 avril 1911. M. R. père. (B. gauche).

F.	O.	F.	O.	INDICE
6.5	14.25	215	14	
				15.4

25 avril 1911. M. R. père. (B. droit).

F.	O.	F.	O.	INDICE
6.25	14.25	229	14	
				16.3

27 avril 1912. M. R. fils. (B. droit).

F.	O.	F.	O.	INDICE
9	18	91	5.5	
5.75	14	257	14	18.3

On voit que l'on obtient pour le biceps, avec cette instrumentation des chiffres qui se répartissent entre 15.4 et 18.3, chiffres extrêmes; avec cette bobine secondaire, l'indice de vitesse est plus élevé qu'avec la bobine de 3390 ohms; c'est-à-dire que la différence d'efficacité des deux ondes est maintenant plus grande.

C'est là le premier fait certain qui résulte de la comparaison de ces deux bobines : avec le petit induit l'indice de vitesse est plus grand qu'avec le grand induit.

Mais un autre fait apparaît d'une façon non moins nette : c'est que pour obtenir le seuil de l'excitation avec le petit induit il faut des quantités d'électricité moindres, toutes choses étant égales d'ailleurs, qu'avec

le grand induit. Ceci ressort déjà de l'ensemble des chiffres que nous avons donnés pour la bobine de 3390 ohms, que pour la bobine de 1651 ohms.

Voici cependant, rapprochées, quelques expériences comparatives, effectuées dans les mêmes conditions l'électrode étant au point moteur avec les bobines de 1651 et de 3390 ohms.

1^{er} mai 1911. M. R... père. (Biceps droit).

	DISTANCE EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
1651 ohms	2.75	12.75	415	23	18
3390 ohms	2.25	11.75	736	67	11

2 mai 1911. M. V... Biceps gauche.

	DISTANCE EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
1651 ohms	6.75	15	201	11	18.2
3390 ohms	7.75	15	274	22.5	12.2

Ces chiffres, démontrent bien les deux faits essentiels, au point de vue de la comparaison de l'efficacité physiologique des deux bobines.

1°) le petit induit (1651 ohms) excite avec des quantités beaucoup plus faibles que le grand induit (3390 ohms).

2°) l'indice de vitesse correspondant au grand induit est plus faible que celui du petit induit; c'est-à-dire que quand on passe du petit induit au grand, le rapport d'efficacité des deux ondes se rapproche de l'unité.

Peut-on rattacher ces faits certains à des notions théoriques certaines?

Le fait que « les petits induits sont plus efficaces que les grands » est connu depuis longtemps; on le trouve exposé, sans explication du reste par Gildemeister (1); l'explication en est simple. Nous avons vu que l'explication en est simple. Nous avons vu que les caractéristiques physiques du circuit secondaire (self

(1) Gildemeister. Induktionsströme als Reize. Pfluger's Archiv. T 131, 1910, p. 601.

induction, résistance ohmique) influent sur la forme des ondes induites; plus le rapport $\frac{L}{R}$ du secondaire est grand, plus est grand le retard à l'établissement de ces ondes dans le secondaire; en somme avec l'augmentation de $\frac{L}{R}$, (ou à résistance ohmique constante avec l'augmentation de la self L), augmente la durée des ondes induites de fermeture et d'ouverture; c'est dire que, les ondes induites dans un grand inducteur (grande self) sont plus longues que les ondes induites dans un petit inducteur (petite self). Or nous savons, que les quantités d'électricité liminaires augmentent avec la durée des ondes (Loi de Hoorweg, Loi de Weiss) Il s'ensuit que les ondes (de grande durée) des grands induits (grande self) ne seront liminaires qu'à condition de mettre en jeu des quantités d'électricité plus grandes que les ondes (de durée plus courte) des petits induits (petite self).

Cette hypothèse explicative que je suggère, peut être soumise à un contrôle expérimental. L'influence de l'augmentation de la self induction sur la durée des deux ondes n'est forte que dans le cas où la résistance ohmique du circuit a une valeur petite, car ce qui compte, c'est non pas la self, mais le rapport $\frac{L}{R}$. Donc, quand la résistance ohmique du circuit secondaire devient de plus en plus forte, les mêmes variations de L , conditionnent des variations du rapport $\frac{L}{R}$ de plus en plus faibles. Et même on peut considérer théoriquement que si la résistance du secondaire devenait infinie, les variations de self dans ce secondaire n'auraient plus d'influence sur la forme des ondes induites.

En tout cas, ce qui peut être soumis au contrôle expérimental, c'est ceci : quand on augmente la résistance du secondaire, on doit atténuer les différences d'efficacité des divers induits, différences que nous avons supposées être sous la dépendance des variations de la self dans le secondaire.

Or c'est là un fait qu'il est inutile de vérifier à nouveau, car il est connu, comme fait expérimental; Gildemeister (loc. cit.), note en effet que l'augmentation de la résistance du secondaire a pour résultat de tendre à atténuer les différences d'efficacité des bobines induites; en particulier on peut par une augmentation de la distance des électrodes, par une diminution de leur surface de contact, par l'introduction de résistances instrumentales, rapprocher de l'unité le rapport des quantités d'électricité minima efficaces avec les divers induits.

Ce fait empirique constaté par Gildemeister est une confirmation manifeste de l'hypothèse émise pour expliquer les différences d'efficacité des divers induits.

Mais le deuxième fait révélé par la comparaison de l'efficacité des induits reste à expliquer. Le grand induit donne des indices de vitesse plus grand que le petit induit; ce fait expérimental peut être traduit de la façon suivante : quand on passe du petit induit au grand induit, le rapport des quantités d'électricité liminaires à la fermeture et à l'ouverture $\frac{Q_f}{Q_o}$ tend à se rapprocher de l'unité; c'est dire — puisque nous savons d'autre part que l'efficacité des deux ondes a été diminuée — que l'efficacité de l'onde d'ouverture a été plus fortement diminuée que l'efficacité de l'onde d'ouverture. L'explication du fait ainsi présenté, apparaît immédiatement :

1°) La self induction, plus grande dans le grand induit, augmente la durée des deux ondes; mais son action retardante s'exerce d'une façon d'autant plus forte que l'onde est plus brève; l'onde d'ouverture doit donc être plus affectée par l'augmentation de la self que l'onde de fermeture.

2°) A cette considération d'ordre physique, s'ajoute une raison physiologique. On sait que pour des durées d'excitation suffisamment grandes, l'intensité liminaire devient indépendante de la durée de passage : c'est dire que les augmentations de durée que produit la self sur les deux ondes d'ouverture et de fermeture, affect-

tent d'une façon prépondérante l'efficacité physiologique de l'onde brève, et n'atteignent que très peu l'efficacité de l'onde longue. Nous retrouvons ici une série d'explications analogues à celles qui nous ont permis de comprendre, que l'augmentation de la rapidité des interruptions du primaire, agisse surtout sur le seuil d'ouverture, et ne modifie que très peu le seuil de la fermeture.

Ainsi sont expliqués théoriquement les deux faits expérimentaux essentiels qui résultent de la comparaison de deux induits différents.

**Égalité de l'indice déterminé, sur le nerf,
et sur le muscle, chez l'homme à l'état normal.**

Toutes les déterminations citées jusqu'ici sont effectuées avec l'électrode négative au point moteur du muscle; mais ce point qui est d'une façon générale le point d'entrée du filet nerveux dans le muscle, s'il est extrêmement précieux au point de vue pratique, parce qu'il présente un point d'excitabilité maxima, où il est possible d'obtenir des contractions avec des intensités particulièrement faibles, ce point ne se montre pas comme particulièrement propice à l'analyse des fonctions musculaires; et nous avons vu que la détermination de l'indice de vitesse présente au point moteur des difficultés particulières, étant données d'une part la localisation souvent extrêmement étroite et exquise de ce point moteur, et d'autre part, la nécessité absolue où l'on est de rechercher les seuils de fermeture et d'ouverture exactement au même point.

Quels résultats obtient-on si, au lieu de rechercher l'indice de vitesse au point moteur, du muscle, on fait les déterminations en plaçant la cathode soit au point moteur du nerf, soit en dehors des points moteurs, en plein muscle?

Si nous nous en tenons tout d'abord au point de vue purement expérimental, nous pouvons dire que *chez l'homme normal l'indice de vitesse est sensiblement le*

même, qu'on le détermine avec l'électrode active négative placée en plein muscle, au point moteur du muscle au point moteur du nerf.

Voici des chiffres qui démontrent l'exactitude de cette proposition.

22 février 1912. *Biceps gauche*. Mlle S. Bobine de 2500 ohms.

1°) L'électrode différenciée négative est sur le point d'Erb (excitation du nerf).

DISTANCE DES BOBINES		QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
6 1/2	14 5/8	217.5	19.4	11.2
7 1/8	15 1/8	188	16.8	11.2

2°) L'électrode différenciée négative est sur le point moteur du biceps :

DISTANCE DES BOBINES		QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
10 5/8	19 1/4	66.5	6.55	10.1
10 3/4	19 1/2	64	6.2	10.3
10 5/8	19 1/2	66.5	6.2	10.7

3°) L'électrode différenciée négative est en plein muscle, en dehors du point moteur.

DISTANCE DES BOBINES		QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
4 3/4	13 3/8	298	28.5	10.5
3 7/8	13	338	32.3	10.4

4°) L'électrode différenciée négative est encore en plein muscle, mais en un autre point :

DISTANCE DES BOBINES		QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
6	14 1/8	239	22.4	10.7
6 1/4	14 1/2	228	20	11.3

5°) L'électrode différenciée négative est au voisinage du tendon inférieur.

DISTANCE DES BOBINES		QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
2 1/4	12 1/4	405	40.4	10
1 1/2	11 7/8	431	45.5	9.5

Que signifient ces résultats ?

Certes ils ne peuvent trancher la question extrêmement délicate de savoir si le muscle et le nerf sont des organes de rapidité analogue, ou de rapidité différente; il faut se livrer pour cela à des analyses plus fines; dans les expériences que nous venons de décrire, rien ne permet d'affirmer d'une manière absolument certaine et incontestable, que suivant la place de l'électrode c'est le tissu musculaire ou le tissu nerveux qui est excité sélectivement; dans le cas où l'électrode négative est au point moteur du nerf, il n'est pas douteux certes que ce soit le nerf qui est excité, et que l'indice de vitesse obtenu, ne soit celui qui est caractéristique de l'excitabilité du tronc nerveux considéré. Mais dans le cas où l'électrode négative est au point moteur du muscle, la question devient déjà plus délicate; l'extrême précision de certains points moteurs, la grande différence qui sépare à un point de vue purement quantitatif l'excitabilité de ces points de points de la surface musculaire très voisins, et la constatation anatomique de l'existence de filets nerveux moteurs, au point où l'on a physiologiquement constaté ces seuils particulièrement bas, semblent bien prouver qu'ici encore — à l'état normal — c'est d'une excitabilité nerveuse qu'il s'agit, mais la question peut être contestée; enfin dans le cas où l'électrode négative différenciée est en plein muscle rien ne peut permettre d'affirmer que l'on détermine les caractéristiques chronologiques d'une excitabilité nerveuse, ou d'une excitabilité musculaire.

Ce n'est que par la critique des faits que l'on observe lorsqu'un agent expérimental permet d'opérer la section physiologique du nerf et du muscle, qu'il est possible de se faire une opinion sur les vitesses comparées de ces divers tissus; c'est sur des déductions tirées de faits observés au cours de la curarisation, des dégénérescences nerveuses, que les anciens auteurs avaient conclu que le nerf organe rapide, commande à un organe lent, le muscle. C'est par une critique nouvelle plus serrée des faits de la curarisation que M. et

L. Lapique ont fondé la théorie de l'isochronisme du nerf et du muscle (1).

Sans permettre de trancher la question, les résultats que nous avons exposés, sont en accord avec les déductions de ces deux auteurs, et confirment que le nerf et le muscle, étant des organes chronologiquement accordés, les caractéristiques chronologiques déterminées en différents points du système neuromusculaire, conservent dans tous les cas, chez l'individu normal, la même valeur.

Nous verrons au contraire des modifications intéressantes de cette relation, à l'état pathologique.



(1) M. et L. Lapique. Comparaison de l'excitabilité du muscle à celle de son nerf moteur. C. R. Soc. Biol., 26 mai 1906.

Variation d'excitabilité du muscle dans la curarisation. C. R. Soc. Biol., 9 juin 1906.

Sur le mécanisme de la curarisation, 26 décembre 1908.

CHAPITRE IV

Résultats obtenus sur l'homme dans divers états pathologiques.

I. Variations de l'indice de vitesse au cours de dégénérescences diverses.

Lorsque, à la suite d'une excitation mécanique, chimique électrique, appliquée sur un nerf, le muscle correspondant répond par une secousse, différents processus se sont développés successivement dans le système considéré, il y a eu mise en jeu de l'excitabilité du nerf, puis de sa conductibilité, puis mise en jeu de la contractilité musculaire; et il est possible de caractériser physiologiquement et de mesurer chacune de ces propriétés du système.

Lorsque à la suite d'une lésion, un système neuromusculaire entre en voie de dégénérescence, les nombreuses modifications histologiques qui se développent, s'accompagnent de modifications correspondantes des différentes propriétés physiologiques que nous venons d'énumérer.

L'excitabilité se modifie (modification de l'efficacité relative aux courants galvanique et faradique, variations de la hauteur des seuils, galvanique et faradiques, inversion de la formule polaire). La conductibilité se modifie (ralentissement de la vitesse de conduction). La contractilité est fortement atteinte (augmentation de la durée de la contraction, diminution de sa hauteur, augmentation de la période latente de la contraction). Tous ces phénomènes évoluent d'une façon simultanée, et manifestent dans des domaines différents l'évolution du processus de dégénérescence.

Pour faire le diagnostic d'une dégénérescence en évolution on pourrait donc s'adresser à l'un quel-

conque de ces paramètres, et l'étudier. En fait, en électro-diagnostic, on s'est jusqu'ici borné à l'étude d'un petit nombre de ces variables.

Les variations de la conductibilité physiologique du nerf, c'est-à-dire, la mesure des variations de vitesse de l'influx nerveux sous l'influence des dégénérescences n'ont pas donné lieu, à ma connaissance, à des recherches cliniques; la difficulté de la méthode qui demande un soin minutieux et une technique expérimentale des plus précises, ne permet pas d'espérer qu'elle passera dans le domaine de la pratique. De même les mesures du temps de latence de la contraction musculaire n'ont donné lieu qu'à des recherches de laboratoire; il faut pour faire des déterminations satisfaisantes en cette matière, une méthode d'enregistrement graphique à grande vitesse, des plus délicates, ou des méthodes électriques nécessitant une instrumentation compliquée. En somme ni la mesure de la vitesse de l'influx nerveux, ni celle du temps de latence ne sont utilisées pour les besoins cliniques. Il ne nous est pas possible de faire ici la bibliographie de cette question, car elle ne touche qu'indirectement à notre sujet; nous nous contenterons de renvoyer aux travaux de Mendelssohn, (1) et de Edinger, (2) où l'on trouvera, avec l'essentiel de nos connaissances sur ce point, un intéressant index bibliographique.

En fait le diagnostic de réaction de dégénérescence se fait surtout sur l'existence de la contraction lente. Mais c'est là un signe qui manque de sensibilité; certes dans les lésions brutales (traumatismes, sections nerveuses) la lenteur de la contraction s'établit avec une grande netteté et une grande rapidité dans les jours qui suivent le traumatisme; mais dans toutes les maladies à évolution lente (radiculite, syringomyé-

(1) *Mendelssohn*. Archives de Physiologie normale et Pathologique 1880, p. 193. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 1883 et 1891. Revue Neurologique, 15 fév. 1903.

(2) *Edinger*. Untersuchungen über die Zuckungcurve des menschlichen Muskels im gesunden und kranken Zustand.

lies, polynévrites légères, la réaction de dégénérescence se développe souvent avec une lenteur telle qu'il s'écoule des semaines et des mois avant que l'on puisse affirmer que la contraction est lente. Tous ceux qui ont pratiqué avec conscience l'électrodiagnostic savent combien il est souvent difficile de dire si la contraction est lente ou vive. On l'aperçoit seulement à travers une peau épaisse, à travers des tissus plus ou moins chargés de graisse, et l'on hésite souvent, dans une longue et pénible incertitude; souvent aussi la contraction *semble* traînante au seuil puis devient vive pour des intensités plus élevées; souvent aussi la première contraction semble paresseuse, tandis que les suivantes semblent vives; entre la contraction vive nettement et la contraction nettement lente existent cela va de soi tous les intermédiaires; pendant toute la période où la contraction se trouve à ces stades d'évolution intermédiaires, le diagnostic hésite; et l'on sait fort bien que si l'on essaye d'apprécier à l'œil des « seuils de lenteur » trop délicats, on risque de faire de grossières erreurs, et d'affirmer l'existence d'une dégénérescence, là où il n'y a qu'affaiblissement passager du muscle.

Il faut avoir l'esprit assez prudent pour attendre que la lenteur se soit nettement établie avant d'affirmer une réaction de dégénérescence; il va sans dire que dans ces cas de lésions légères où la lenteur est douteuse, si l'on essaie de faire des diagnostics de localisation topographique on risque d'aboutir à une pure fantasmagorie. En somme la lenteur de la contraction est un signe qui ne peut être affirmé que lorsque la dégénérescence est nettement établie, un temps parfois extrêmement long après l'action de l'agent pathologique et c'est souvent dans le cas (évolution très lente) où un diagnostic certain serait le plus utile, que ce signe peu sensible se trouve en défaut.

La lenteur de la contraction est donc un signe sûr, mais fort peu sensible; il présente en outre l'inconvénient de ne se prêter qu'avec une extrême difficulté à une mesure chiffrée; si l'on voulait suivre l'évolu-

tion des réactions de dégénérescence en mesurant à des moments divers du cours de la maladie la durée de la contraction musculaire, il faudrait employer une technique de méthode graphique très délicate, et il est bien certain que ces recherches ne sauraient être généralisées et employées couramment dans la pratique.

Quant aux résultats que l'on obtient par l'étude quantitative des seuils au courant galvanique et faradique, ils sont souvent contingents et difficilement interprétables; contingents parce que les modifications de la résistance de la peau, les modifications de la position de l'électrode, rendent souvent d'une expérience à l'autre les déterminations peu comparables; et parce que les variations d'efficacité de l'électrode suivant le plus ou moins grand degré de maigreur des sujets, rendent en tout cas par trop illusoire la comparaison obtenue avec les divers sujets. Erb avait très nettement étudié cette difficulté; il avait créé une méthode qu'il expose longuement dans ses leçons, et qui était destinée à assurer aux déterminations quantitatives de l'excitabilité galvanique et faradique une objectivité relative (1) et à « émanciper » la recherche des seuils sur un malade de la comparaison obligée avec les seuils sur un individu sain. Il déterminait sur différents individus sains le seuil de l'excitation galvanique et faradique pour 4 troncs nerveux, et fixait ainsi la valeur relative de l'excitabilité chez les individus sains. Les modifications de ces rapports d'excitabilité devaient assurer le diagnostic des modifications pathologiques. Mais cette méthode, très longue, est peu pratique, et je ne l'ai vue nulle part utilisée dans les services d'Electrodiagnostic.

Ces résultats obtenus sont contingents, en outre ils sont peu interprétables; nous savons qu'une modification simple des seuils peut tenir à des causes très diverses; seuls les cas où l'excitabilité galvanique est

(1) Erb. Traité d'Electrothérapie. Traduction française, Rueff, page 134 et suivante.

augmentée et l'excitabilité faradique diminuée permettent de présumer l'existence d'une réaction de dégénérescence avec ralentissement des divers processus d'excitation de conduction et de contraction.

Que devient dans ces cas de dégénérescence la vitesse d'excitabilité ?

L'indice de vitesse est d'une part, nous l'avons vu dans une très large mesure indépendant des contingences expérimentales; il n'est pas, comme la hauteur du seuil, sous la dépendance de facteurs n'ayant aucune relation directe avec la valeur fonctionnelle du muscle étudié; bien au contraire, les relations étroites qui relient la vitesse d'excitabilité à toutes les caractéristiques profondes de l'excitabilité (durée produisant le seuil avec une dépense d'énergie minima — faculté de sommation, pente limite, etc.) montrent qu'il s'agit bien là d'un paramètre qui atteint d'une façon très délicate, l'intimité profonde du processus d'excitation; il exprime dans la catégorie excitation les phénomènes de plus ou moins grande lenteur que l'on observe dans la catégorie contraction. En outre la détermination de l'indice de vitesse se fait par l'appréciation très sensible de deux seuils, ne laissant à l'interprétation personnelle, qu'une place extrêmement faible, à l'inverse de l'estimation d'une lenteur de contraction.

Ces diverses raisons inclinent à penser que les variations de la vitesse d'excitabilité au cours de dégénérescences doivent être très instructives.

Nous avons recherché les valeurs de l'indice de vitesse dans divers états pathologiques. Voici des déterminations effectuées chez des sujets présentant de la réaction de dégénérescence nette.

Voici d'abord des chiffres correspondant à des malades atteints d'affections unilatérales.

I) *Madame C.*, (Elongation du plexus brachial droit), âgée de 41 ans, sans profession. La malade a fait le 3 mars, une chute dans un escalier; en tombant

elle s'est fait une luxation de l'épaule, qui a été réduite le lendemain seulement, à 11 heures du matin.

Une paralysie s'est établie qui est complète sur les muscles de la main, sur les extenseurs des doigts, l'avant-bras; les mouvements de l'épaule, et les mouvements de l'avant-bras sur le bras sont possibles, la force musculaire étant seulement diminuée d'une façon notable.

A l'examen électrique, pratiqué selon la méthode classique, on constate une DR partielle, avec lenteur légère, excitabilité galvanique normale, et légère hypoexcitabilité faradique dans les muscles suivants :

Deltoïde,

Triceps brachial,

Extenseurs à l'avant-bras,

Tous les muscles de la main.

Tous les muscles sont cependant excitables, par leur nerf au galvanique et au faradique.

Le 10 avril 1911 : Bobine de 3390 ohms. Au point moteur.

	DISTANCE EN CM.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Deltoïde antérieur	F.	O.	F.	O.	
Gauche (normal)	4.75	12.75	512	47	10.9
Droit (DR. partielle)	4.25	12	556	62	8.9

Bobine de 1739 ohms. Au point moteur.

	DISTANCE EN CM.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Deltoïde antérieur	F.	O.	F.	O.	
Gauche (normal)	0.15	13.25	350	21	16.7
Droit (DR partielle)	0	12.25	376	30	12.6

Le 21 avril 1911. Extenseurs communs des doigts; à gauche, réactions électriques habituelles normales; à droite PFC > NFC et contraction lente; mais excitabilité faradique conservée. — Bobine de 1651 ohms.

	DISTANCE EN CM.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Coté gauche sain	3.75	12.75	366	23	16
Coté droit (DR)	2.25	11.75	439	34	12.9

Tous les chiffres présentés témoignent d'une baisse notable de l'indice du côté malade.

II) *Monsieur D.* (Paralysie radiale droite). La paralysie consécutive à un traumatisme de l'aisselle (blessure par coup de couteau) datant du 29 juin 1910, a porté sur tout le radial, à l'avant-bras, et au bras; au moment où on pratique l'examen, la réparation est presque complète; le malade a retrouvé l'usage de tous ses muscles, avec diminution nette encore de la force musculaire.

Au point de vue de l'électrodiagnostic classique, on constate une simple hypoexcitabilité galvanique et faradique légères, dans tous les muscles, ayant participé à la paralysie; il n'y a plus de lenteur, sauf dans le vaste externe qui est encore très légèrement lent au galvanique.

Pour l'extenseur commun des doigts, on a à droite et à gauche PFC , à droite NFC = 2, 5 mas; à gauche NFC = 2,4 mas; pas de lenteur, en somme réactions actuellement sensiblement normales.

Le 27 avril 1911. Extenseur commun des doigts, au point moteur.

1°) Bobine de 1651 ohms.

	DISTANCE EN CM.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.*	F.	O.	
Côté gauche (sain)	1.75	12	461	30	15.4
Côté droit (a eu de la DR)	2.5	11.25	427	40	10.7

2°) Bobine de 3390 ohms.

	DISTANCE EN CM.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Côté gauche (sain)	2.25	11.5	736	74	9.9
Côté droit (a eu de la DR)	3	10.75	665	96	6.2

Ici encore le côté normal a un indice sensiblement normal, le muscle du côté droit au contraire a un indice notablement plus bas que la normale.

III). *Mlle N.*, âgée de 53 ans, cuisinière. Paralysie faciale gauche périphérique, classique, survenue le 3 mai, sans cause appréciable; la malade s'en est aperçue à son lever.

La malade présente tous les signes classiques de la paralysie faciale périphérique. La bouche se trouve entraînée complètement du côté sain, les plis de la face sont atténués du côté paralysé. L'œil gauche est grand ouvert, avec une inflammation conjonctivale très marquée; le larmoiement est considérable. La pupille gauche est dilatée. La malade ne peut siffler, ni souffler, et elle accuse des signes très nets de gêne de la mastication.

Le signe de Charles Bell existe.

An point de vue électrique, le 5 mai, il n'y a pas encore de troubles nets; pas de DR ni d'hypoexcitabilité.

Le 23 mai, au point moteur, la contraction est lente il y a de l'inversion, sur les fibres de l'orbiculaire inférieur gauche.

23 mai 1911. Orbiculaire inférieur des lèvres. — Bobine de 3390 ohms.

	DISTANCE EN CM.		SEUIL EN DISTANCE		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Côté droit (normal)	7	13.75	330	33	10
Côté gauche (paralysie)	3.25	12.75	160	47	3.4
	9	12.75	176	47	3.75

La baisse de l'indice sur le côté paralysé est ici considérable. Ces derniers chiffres sont d'ailleurs particulièrement instructifs, car ils montrent combien la simple notion de hauteur de seuil est contingente, relative à la durée de l'onde excitante, et par conséquent difficile à interpréter. Le seuil à l'onde d'ouverture est 33 pour le côté sain, et 47 pour le côté malade; donc hypoexcitabilité du côté pathologique à l'onde faradique d'ouverture. Le seuil de fermeture est 330 pour le côté sain et 160 pour le côté malade : donc hyperexcitabilité du côté malade à l'onde faradique de fermeture. Que

conclure du point de vue de l'électrodiagnostic classique qui distingue seulement excitabilité galvanique et excitabilité faradique? Du point de vue au contraire de la vitesse d'excitabilité, les faits se comprennent bien. Le muscle pathologique ralenti est hyperexcitable aux ondes longues, et hypoexcitable aux ondes brèves. Les lois d'excitation en quantité qui caractérisent l'excitabilité des deux tissus, se coupent en un point dont l'abscisse est une durée intermédiaire à la durée de l'onde de fermeture et à la durée de l'onde d'ouverture.

IV). Monsieur M... Blessure du plexus brachial à gauche par balle de revolver, datant du 25 mai 1911. Le malade présente de l'impotence complète du membre supérieur gauche. Le biceps, que nous étudions ci-dessous au point de vue de l'indice de vitesse présente des réactions électriques assez curieuses. Dans l'excitation par le nerf la contraction est assez vive. Dans l'excitation au point moteur, les choses se passent différemment suivant l'intensité du courant excitant; avec un courant faible (3 mas) on a le seuil de NFC, pas de contraction à PFC, et NFC est vif; avec un courant moyen (5-6 ma), les deux contractions sont vives; avec des intensités plus fortes, la contraction devient lente, (lenteur à la décontraction surtout) d'abord avec PFC puis avec NFC.

Le 14 juin 1911.— Biceps. Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCE DES BOBINES en cm.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Coté droit	10.5	13 1/4	104	9	11.5
(normal)	10.5	13	104	9.5	10.9
Coté gauche (DR)	5.5	12 1/8	446	59.5	7.5
partielle	5 1/4	12 1/8	468	59.9	7.9

V). Monsieur R., 33 ans, tailleur. — Paralysie faciale gauche, sans étiologie claire, survenue dans la nuit du samedi 10 juin au dimanche 11. Le samedi et le dimanche le malade a accusé une céphalée très violente et persistante.

Dès le premier jour (11 juin) la paralysie faciale a été aussi accentuée qu'elle l'est actuellement; le malade ne peut arriver à fermer l'œil gauche, ni à plisser le front à gauche. La bouche est un peu déviée vers le côté droit, mais la déviation est légère, au repos; cependant quand le malade ouvre la bouche, celle-ci est nettement déformée, la luvette est déviée vers la droite; durant les premiers jours de la paralysie l'œil gauche était le siège d'un larmolement abondant; actuellement il n'y a ni larmolement, ni salivation.

A l'examen électrique, les réactions sont peu altérées; il y a seulement une très légère diminution de l'excitabilité faradique sur l'orbiculaire des lèvres et le frontal, à l'excitation directe et indirecte. L'électrode différenciée étant positive, on observe une très légère lenteur de la contraction; en outre, l'orbiculaire des lèvres à gauche présente une très légère hyperexcitabilité galvanique longitudinale que l'on constate quand on excite le côté sain (pseudo-réflexe contralatéral).

Le 27 juin 1911. Orbiculaire inférieur des lèvres. L'examen électrique classique donne : NFC = 2 ma., à gauche, hyperexcitabilité galvanique directe : NFC = 0.8 ma. Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCE DES BOBINES en cm.		SEUIL EN QUANTITÉ		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Côté droit (normal)	5.875	13.5	418	36	11 6
Côté gauche (paralysé)	7.5	13	292	42	6.9

VI. *Mlle E.* — Paralysie faciale droite survenue sans cause appréciable, depuis quinze jours; signes classiques de la paralysie faciale périphérique. Impossibilité de plisser le front, de fermer l'œil, de siffler, de rire du côté paralysé; larmolement léger, signe de Charles Bell. Au repos la bouche est légèrement déviée vers le côté sain. A l'examen électrique on constate sur les muscles paralysés, à l'excitation directe et à l'excitation indirecte une hypoexcitabilité faradique nette avec une hyperexcitabilité galvanique marquée;

(Ex. : orbiculaire intérieur des lèvres à gauche NFC = 0.3 ma; à droite 1,2 ma). Cette hyperexcitabilité galvanique du côté paralysé se manifeste d'une manière extrêmement nette quand on excite le côté sain; on excite alors à distance le côté paralysé pour des intensités auxquelles l'excitation reste complètement inefficace du côté sain.

D'une façon générale les contractions sont lentes; cependant l'excitation du nerf, avec le pôle négatif différencié donne une contraction généralement vive.

Le 29 juin 1911. Orbiculaire inférieur des lèvres; à droite (côté paralysé) on a NF > PF (c'est-à-dire pas d'inversion); une hyperexcitabilité galvanique nette : NF = 0,3 ma, et de la lenteur à la contraction. — A gauche, les réactions sont normales. — Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCE DES BOBINES EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Côté droit	8.3/4	14.1/8	196	29	6.75
id.	8.3/4	13.7/8	196	31.5	6.2
Côté gauche	8.1/8	15.1/4	245	21.25	11.5
id.	8.1/8	15.1/2	245	20	12.2

VII^e. Mlle R., domestique, 63 ans. Maladie de Parkinson unilatérale, siégeant à gauche, et présentant tous les signes parkinsoniens classiques. Attitude complètement soudée, corps continuellement penché en avant, tremblement de faible amplitude caractéristique sur la main gauche, le tout survenu il y a environ 4 mois à la suite semble-t-il d'une chute, ayant causé à la malade une émotion très vive.

Il y a un mois, la malade a été prise par une paralysie faciale, sans cause appréciable, atteignant d'une façon à peu près uniforme tous les muscles innervés par le facial supérieur, inférieur et moyen, à gauche; quand la malade se présente à l'examen électrique, elle a tous les signes classiques d'une paralysie faciale périphérique; (œil ouvert; front lisse du côté gauche, bouche extrêmement déviée, signe de Ch. Bell. pas

de larmolement). Au point de vue électrique, on constate une hypoexcitabilité faradique généralisée et une DR partielle très intense dans les muscles innervés par le facial.

23 août 1911. Orbiculaire inférieur des lèvres. (DR avec lenteur dans tous les muscles de la face à gauche.). Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCE DES BOBINES EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Coté droit	7.5	14.5	307	26.6	11.5
Coté gauche	7	10 1/8	338	12.4	2.7

VIII). Monsieur L., âgé de 23 ans, employé des pompes funèbres : Paralysie radiale gauche survenue pendant le sommeil du malade, qui s'est réveillé paralysé.

Impotence fonctionnelle complète dans le domaine du radial à l'avant-bras, y compris le long supinateur.

Au point de vue électrique DR complète typique dans les extenseurs des doigts. Hypoexcitabilité galvanique et faradique très considérable au point moteur, avec lenteur de la contraction, sans inversion. Inexcitabilité galvanique et faradique du nerf complètes.

Le 2 septembre 1911. — a) Extenseur commun des doigts; à droite, on a NF = 4 mas, la contraction est vive, à gauche NF = 2 mas, la contraction est lente.

	DISTANCE DES BOBINES EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Coté droit	6.5	13.3/8	384	37.8	10.2
Coté gauche	6.5	10.5	384	106	3.6

b) Cubital postérieur; à droite, NF > PF; NF = 2 mas, contraction vive; à gauche, NF > PF; NF = 5 mas, contraction lente.

	DISTANCE DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
Coté droit	73/4	14.3/8	288	27.5	10.5
Coté gauche	6	10.3/4	431	98	4.4
id.	6 1/8	10.5/8	418	102	4.1

Voici maintenant un cas d'affection bilatérale, où la lenteur était nette des deux côtés et où, de même, l'indice a diminué de valeur des deux côtés.

IX. Madame S. — Syringomélie. Atrophie musculaire aux membres supérieurs, maximum à la main, moins accentuée à l'avant-bras.

Le 28 avril 1911 : Extenseur commun des doigts. A droite, contraction lente, pas d'inversion, NF = 1 ma A gauche, contraction lente, pas d'inversion, NF = 1,5 ma. Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCE DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
à droite	2.75	8.75	688	196	2.5
à gauche	1.75	9.25	787	160	4.9

Toutes les observations que nous avons rapportées jusqu'ici ont trait à des cas, où l'examen électrique habituel, révélait, de la lenteur de la contraction, c'est-à-dire une réaction de dégénérescence nette; mais j'ai observé des cas, où l'examen classique ne permettait nullement d'affirmer une dégénérescence en évolution (absence d'inversion, pas d'hyperexcitabilité galvanique, pas de lenteur,) et où les variations de l'indice, permettaient d'affirmer dans le tissu, un ralentissement net, signe d'une dégénérescence certaine, en évolution.

C'est au cours de polynévrites légères que j'ai observé ces faits.

X. Monsieur B. Pseudo-tabes polynévritique, âgé de 50 ans, employé aux bureaux du P.-L.-M. Antécédents personnels, rhumatisme lombaire il y a 15 ans, puis reprise des douleurs 3 ans plus tard; depuis deux ans, douleurs lombaires incessantes; sciatique gauche il y a 4 ans, sciatique droite il y a 2 ans. Pas d'excès

de boissons; 1/2 litre de vin blanc par jour; pas d'alcool. La maladie a débuté il y a 3 semaines par des fourmillements et engourdissements dans les doigts, les orteils, et la jambe jusqu'au genou. Les mollets sont très douloureux en permanence, la pression augmente considérablement la douleur. Les jambes sont faibles, le malade éprouve de la difficulté à monter les escaliers; s'il monte très vite sa marche devient incoordonnée, le malade talonne; Romberg léger.

Les réflexes achilléens et rotuliens sont abolis; mais il n'y a pas d'amyotrophie; la parésie est plus marquée à droite qu'à gauche, elle n'existe que dans les muscles de la loge antérieure de la jambe.

Le réflexe de Babinski est en flexion des deux côtés, il est légèrement diminué à droite; les réflexes créma-tériens et abdominaux sont normaux des deux côtés. Pas de signe d'Argyll.

Pas de troubles sensitifs objectifs, ni aux membres supérieurs, ni aux membres inférieurs; pas de troubles stéréognosiques.

A l'examen électrique les réactions sont normales dans tous les nerfs et les muscles des membres inférieurs.

Le 27 avril 1911. Jambier antérieur, réactions normales des deux côtés.

	DISTANCE DES BOBINES EN cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
à droite	3.75	10.25	596	113	5.25
à gauche	5	12	490	62	7.9

Le 13 mai 1911. Extenseur commun des orteils, réactions normales des deux côtés.

	DISTANCE DES BOBINES EN cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
à droite	3.75	10.75	596	96	6.2
à gauche	1.25	10.75	836	96	8.7

On voit que pendant toute une longue période l'électrodiagnostic pratiqué selon les procédés habituels n'a signalé aucun trouble des réactions électriques, alors

que les muscles présentaient un ralentissement net; les variations de l'indice sont donc un signe beaucoup plus sensible que l'apparition de la lenteur à la contraction. Il est à noter que l'indice est le plus faible du côté qui présentait les troubles moteurs les plus nets, du côté droit.

Voici un autre cas analogue.

XI). Monsieur B... âgé de 44 ans, représentant de chaussures. Prend régulièrement 2 absinthes par jour, et fréquemment deux ou trois absinthes de suite; prend de l'alcool dans son café, et 1 litre de vin à chaque repas. Depuis quelque temps, vu la chaleur il a pris plus d'absinthe que de coutume et a en outre consommé de très grandes quantités de bière.

Depuis le 9 août il est gêné pour marcher, et la gêne augmente progressivement depuis cette date; il marche avec un steppage peu accentué, mais net. Les réflexes rotuliens et achilléens sont abolis des deux côtés.

La pression des masses musculaires et des nerfs est plus douloureuse à droite qu'à gauche et plus douloureuse aux jambes qu'aux cuisses.

Comme troubles sensitifs objectifs il y a simplement à la face plantaire des orteils une abolition de la sensibilité à la douleur avec conservation de la sensibilité tactile. A l'examen électrique on constate seulement dans le domaine du sciatique poplité externe des deux côtés, une diminution simple de l'excitabilité galvanique, sans inversion ni lenteur.

Le 24 août 1911. Jambier antérieur : des deux côtés, diminution simple de l'excitabilité galvanique sans inversion, ni lenteur.

	DISTANCE DES BOBINES EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
à droite	5	11.125	524	87	6
id.	5.1/8	11.1/4	511	84	6.1
à gauche	7	12.3/8	338	53.5	6.3

Le 12 septembre 1911. — Amélioration nette au point de vue clinique. Jambier antérieur. Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCE DES BOBINES EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
à droite	6	12.5	431	51.5	9.4
à gauche	5 7/8	12 5.3	441	49.5	9

On voit que l'indice de vitesse, suit d'une façon extrêmement fidèle les réactions de dégénérescences, et est un réactif bien plus sensible que l'appréciation de la lenteur.

Il était dès lors permis de penser, que si l'on prenait périodiquement des déterminations d'indices de vitesse au cours de dégénérescences en évolution, on pourrait coter ainsi la marche du processus pathologique, de même qu'on cote par les variations de la température, l'évolution d'une maladie infectieuse.

Evolution de muscles pathologiques suivies au moyen de l'indice.

J'ai donc recherché la courbe d'évolution de l'indice de vitesse au cours de maladies des nerfs périphériques, accompagnées ou non de DR.

I). Monsieur B. Polynévrite, voir ci-dessus. Observation X.

Étude de la courbe d'évolution de l'indice de vitesse sur le *Jambier antérieur droit*. Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
	F.	O.	F.	O.	
27 avril	3.75	10.25	596	11.3	5.25
28 avril	1.25	9.75	836	13.3	6.3
1 ^{er} mai	3.25	11.25	642	81	7.9
11 mai	3.75	11.75	596	67	8.8
	2.75	11.5	688	74	9.3
20 mai	1.25	11.25	836	81	10.3
2 juin	1.5	11.25	812	81	10
21 juin	1 3/8	11 3/8	824	77	10.7
6 juillet	1.25	10.875	836	92	9.1
16 août	2.25	11.625	736	70	10.5
30 novembre	1.25	11.3/8	836	77	10.9

J'ai reporté ces résultats sur le graphique fig. 17. (courbe A) en prenant une moyenne entre les 2 déterminations d'une même date, lorsqu'elles sont différentes.

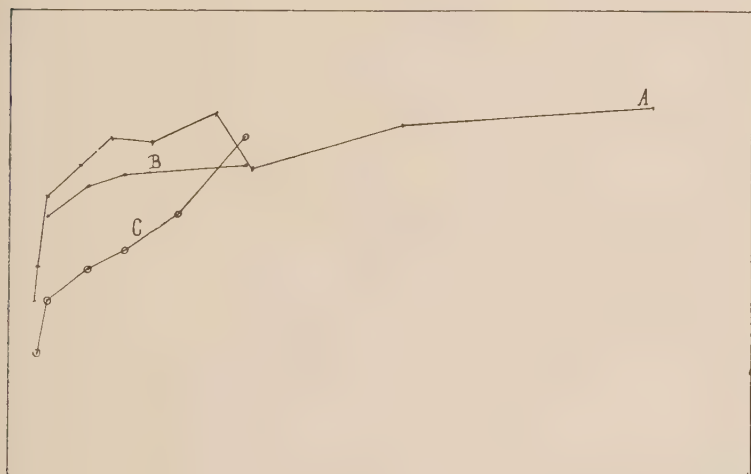


Fig. 17

On voit combien l'indice de vitesse est un moyen d'analyse précieux et combien il peut aider le diagnostic et le pronostic, puisqu'il permet de suivre avec une grande délicatesse l'évolution du processus pathologique.

Voici également quelques chiffres pris de loin en loin au cours de la maladie, et relatifs, à *l'extenseur commun des orteils à gauche*.

	DISTANCES DES ROBINES EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
1 ^{er} mai	2.25	10.75	736	96	7.6
	2.5	11	710	88	8
13 mai	2	11	762	88	8.6
	1.25	10.75	836	96	8.7
24 mai	3.75	11.5	596	74	9
29 juin	0,3/8	10.3/4	878	96	9.1
	0,3/4	10.7/8	872	92	9.5

J'ai représenté ces résultats sur le graphique fig. 17 (courbe B.).

Enfin voici les chiffres qui correspondent chez ce malade à l'évolution de la vitesse d'excitabilité sur *l'extenseur commun des orteils à droite*.

	DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
28 avril 1911	2.25	8.75	736	196	3.7
	3	9	665	176	3.7
1 ^{er} mai 1911	4.75	10.75	512	96	5.3
	4	10.75	582	96	6
13 mai 1911	3.75	10.75	596	96	6.2
	3.75	10.75	596	96	6.2
24 mai 1911	3.75	11	596	88	6.7
	2	10 7/8	762	92	8.3
10 juin 1911	2	10.5	762	104	7.3
	2 1/8	11 1/8	848	84	10.1
29 juin 1911	1 1/4	11 1/4	836	81	10.3

Ces résultats sont représentés sur le graphique (fig. 17. courbe C.)

II). J'ai également suivi l'évolution de la réaction de dégénérescence, au cours d'une paralysie faciale périphérique gauche. Mlle N. (voir ci-dessus observation III). Bobine de 3.390 ohms. Étude de l'orbiculaire inférieure des lèvres gauche.

	DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
	F.	O	F.	O	
5 mai	7	13.5	330	36	9.2
9 mai	4.25	10.5	556	104	5.3
	3	10.5	665	104	6.4
19 mai	7	13.25	330	39	8.4
	7.5	13.5	292	36	8.1
20 mai	8.5	12.75	215	47	4.6
23 mai	9.25	12.75	160	47	3.4
	9	12.75	176	47	3.7

2 juin	10	13.3/8	122	37.5	3.2
	9.3/4	13.1/8	133	40.5	3.2
9 juin	9.3/8	13.3/8	152	37.5	4.05
	9.5	14	145	30	4.8
19 juin	9.1/8	12.7/8	168	44.5	3.7
23 juin	9.3/4	12	133	62	2.14
5 juillet	9	12.3/4	176	47	3.7
	8.5	12.5	215	52	4.1
1 ^{er} septembre	8.5	13.3/4	215	33	6.5
	8.3/4	13.7/8	196	31.5	6.2
28 novembre	9	15.3/8	176	20.625	8.5

Cette courbe d'évolution montre nettement l'établissement assez rapide de la dégénérescence, puis sa réparation graduelle, plus lente. (fig. 18. courbe A.)

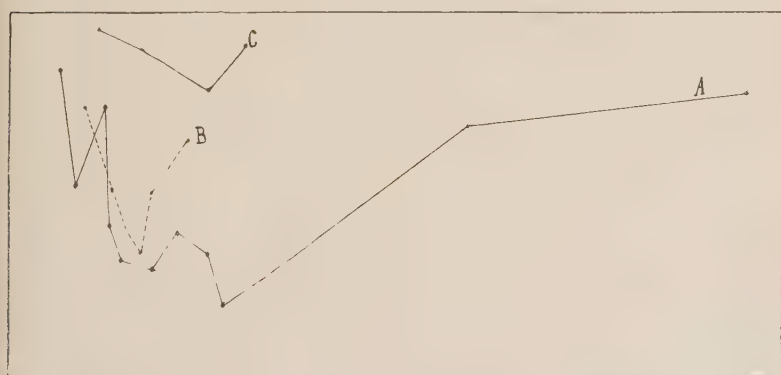


Fig. 18

A quoi tiennent les irrégularités assez importantes que l'on aperçoit sur la courbe? La malade venait se faire examiner après une séance de traitement par le courant galvanique, qui avait duré une dizaine de minutes; on pourrait penser que ces longs passages de courant continu sont la cause des irrégularités; ils agiraient en produisant des modifications passagères de l'excitabilité, électrotoniques et postélectrotoniques, modifications qui ne se retrouveraient pas les mêmes dans les différents examens. Mais je pense qu'il s'agit de perturbations d'autre nature; l'orbiculaire des lèvres

est un muscle impair, dans lequel les fibres du côté droit et les fibres du côté gauche s'enchevêtrent et se mélangent; aussi lorsque l'on essaie d'exciter l'orbiculaire à gauche, on peut avoir sous son électrode des mélanges de fibres saines et de fibres dégénérées; ajoutons aussi que la paralysie faciale n'est sans doute pas une lésion massive atteignant d'une façon globale et avec une égale intensité toutes les fibres du facial, de sorte que parmi même les fibres musculaires de l'orbiculaire, dépendant du facial paralysé il peut s'en trouver de saines, ou de dégénérées à des degrés divers; on pourra s'expliquer ainsi que suivant les jours on puisse exciter des fibres différentes et obtenir des indices différents. C'est ainsi par exemple que les points correspondant au jour 19 mai sont — vraisemblablement — relatifs à des fibres autres que celles qui correspondent aux déterminations voisines. Suivre la réaction de dégénérescence sur un orbiculaire des lèvres, après une paralysie facile a frigore, était un dessein assez téméraire; cependant la courbe obtenue est très instructive et montre d'une façon très nette l'évolution de la lésion.

Signalons en outre une autre difficulté de la détermination sur ce muscle; nous avons dit qu'une précaution essentielle était d'obtenir la résolution musculaire complète; cette condition est d'une façon générale très difficile à réaliser; les malades comprennent souvent mal ce que l'on attend d'eux, et fréquemment plus ils font d'effort pour détendre leurs muscles, plus au contraire ils les maintiennent en un léger tonus, suffisant pour altérer les déterminations; or cette cause d'erreur agit d'une façon particulièrement intense sur les muscles comme l'orbiculaire, où le côté sain, privé de l'antagoniste symétrique, est en état de légère contraction permanente et distend les fibres du côté paralysé.

Voici maintenant quelques chiffres correspondant à l'orbiculaire supérieur paralysé, qui semble s'être réparé un peu plus rapidement que l'orbiculaire inférieur. Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
12 mai 1911	6.25	12.75	387	47	8.2
	5.75	12.5	426	52	8.2
20 mai 1911	7.5	13.25	215	39	5.5
	8.75	13.95	196	33	5.9
29 mai 1911	8.75	12.25	196	57	3.4
	8.75	12.75	197	47	4.1
2 juin 1911	9.25	14.1/8	160	29	5.5
13 juin 1911	9.5/8	15.5/8	139	19.37	7.2

Les chiffres ci-dessus sont représentés par le graphique de la fig. 18, courbe B).

Notons en outre sur cette paralysie faciale un fait intéressant; si l'on recherche la valeur de l'indice du côté non paralysé, l'électrode différenciée étant au point moteur du muscle, on peut constater au cours de l'évolution de la lésion, une baisse du rapport, qui pour être *très légère* n'en est pas moins certaine : voici les chiffres de l'orbitulaire supérieur à droite (côté sain) sur cette même malade. Bobine de 3.390 ohms.

	DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
16 mai 1911	7.75	14.5	274	26	10.5
29 mai 1911	8.25	14.75	235	24	9.8
13 juin 1911	7.25	13.25	310	39	8
19 juin 1911	6.75	13	347	42	8.3
	6.625	13.125	356	40.5	8.8
28 juin 1911	7	13.75	330	33	10
	7.25	14	310	30	10.3

On voit que le phénomène, quoique petit est certain (fig. 18, C.). Pour bien concevoir combien il est petit par rapport au phénomène que l'on observe sur le côté malade, il faut se rapporter à ce que nous avons dit au paragraphe : théorie des indices de vitesse; nous avons montré que pour faire baisser l'indice de la même quantité il faut des variations de la vitesse d'excitabilité d'autant plus fortes que cette vitesse d'excitabi-

lité est plus faible; c'est dire que le passage de l'indice de 10 à 8, traduit une variation de la vitesse d'excitabilité beaucoup plus faible qu'un passage de 8 à 6, et de 6 à 4.

Il y a donc des altérations du côté sain, très légères il est vrai; il va sans dire que ces altérations passaient complètement inaperçues aux méthodes de l'électrodiagnostic classique; les réactions électriques que l'on recherche habituellement étaient absolument normales.

Comment expliquer cette altération? Deux hypothèses sont possibles : ou bien, du fait de la paralysie de l'orbiculaire opposé, le muscle sain subit dans sa totalité une légère atrophie, analogue à celles qui surviennent toutes les fois qu'un muscle pour une raison quelconque (ankylose d'articulation, immobilisation forcée à la suite d'une fracture, etc.) fonctionne peu, ou fonctionne d'une manière anormale; mais il est aussi possible que l'orbiculaire à droite (côté sain) contienne des fibres musculaires « croisées » dépendant du facial gauche, et ayant dégénéré complètement; et nous verrons en critiquant la valeur de la méthode des indices de vitesse, que, dans le cas de mélanges de fibres à vitesse d'excitabilité différente, l'indice peut parfois prendre une valeur intermédiaire aux valeurs des indices qui correspondraient aux deux espèces de fibres étudiées.

Toutes les déterminations étudiées jusqu'à maintenant sont effectuées au point moteur du muscle. Mais nous avons signalé précédemment que, à l'état normal, l'indice est le même qu'on le détermine au point moteur du muscle, en plein muscle, ou au point moteur du nerf : que devient cette relation à l'état pathologique?

Indice de vitesse du nerf déterminé au point moteur du nerf.

Nous abordons ici une question qui n'est pas encore complètement élucidée; mais les premiers résultats obtenus, permettent déjà des conclusions intéressantes que je veux exposer.

Tout d'abord, lorsque nous faisons de l'excitation d'un muscle par son nerf, la détermination de l'indice de vitesse présente sur la simple détermination des hauteurs de seuil, un avantage nouveau non encore signalé.

Lorsque par un procédé quelconque, on détermine une hauteur de seuil, sur un système neuromusculaire quelconque, la valeur obtenue, dépend non seulement de l'excitabilité du point où se développe le processus d'excitation, mais encore, de l'excitabilité et de la conductibilité de tous les points du système où cette excitation va se transmettre.

Exemple : Soit un muscle (fig. 19) que nous excitons indirectement par son nerf, au moyen de deux électrodes a (+) et b (—). Il est admis à la suite d'un grand nombre d'expériences convergentes, que l'excitation de fermeture naît au contact de la cathode instrumentale b; mais la hauteur de seuil que l'on détermine est

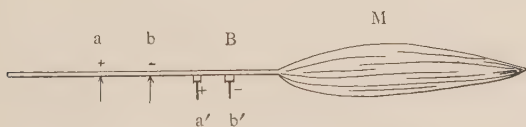


Fig. 19

facteur de l'excitabilité et de la conductibilité des régions B et M; si par exemple nous faisons agir en B un fort courant constant (a' et b') l'excitation née en b devra pour se transmettre au muscle passer sur une région fortement anélectrotonisée (en a') (diminution de l'excitabilité et de la conductibilité) et par conséquent le seuil de fermeture déterminée avec les électrodes a et b, va s'élever considérablement, sans que pourtant l'excitabilité en b se soit en rien modifiée. On peut obtenir un résultat analogue en curarisant la préparation; tous les travaux effectués sur le curare montrent que le nerf n'est pas touché par ce genre d'intoxication; or on sait que rapidement l'excitabilité indirecte décroît, et si l'intoxication est suffisamment

forte, le muscle peut devenir complètement inexcitable par son nerf. Dans ce cas encore, l'excitabilité du nerf n'ayant pas changé, le seuil en b s'est élevé d'une façon progressive jusqu'à l'infini. On voit combien est complexe l'interprétation d'une hauteur de seuil et combien l'analyse, des facteurs qui la font varier, déjà délicate dans des circonstances expérimentales bien précises devient, pratiquement impossible dans les cas pathologiques.

La vitesse d'excitabilité au contraire, caractérise d'une façon étroite l'excitabilité du point où se développe le processus d'excitation. De nombreuses expériences le prouvent; comme c'est là un point important au point de vue de l'interprétation des résultats obtenus avec la méthode des indices de vitesse, nous allons donner ici quelques-uns des faits qui légitiment cette assertion.

1°) M. et L. Lapicque ont montré que au cours de l'intoxication curarique, pendant que le seuil de l'excitabilité indirecte s'élève, la vitesse d'excitabilité déterminée sur le nerf conserve une valeur constante (Le nerf ne participant pas à l'intoxication curarique, fait connu depuis Claude Bernard).

2°) Si l'on fait (comme l'ont fait Cardot et Laugier) des variations de température (1) sur le trajet de l'excitation, la vitesse d'excitabilité n'est pas modifiée; elle ne varie que si la variation de température atteint la région de la cathode. Voici une expérience.

a) Excitation bipolaire (par électrodes liquides impolarisables, Ag, Ag Cl, Na Cl) sur le sciatique de *Rana temporaria*) courant ascendant; un tube de verre où circule l'eau à température variable, croise le nerf au point où il est en contact avec l'anode. Déterminations faites de 5 en 5 minutes :

(1) H. Cardot et H. Laugier. Localisation des excitations de fermeture dans la méthode dite unipolaire. — J. de Physiol. et Path. gén., 1912, 476-490.

TEMPÉRATURE DE L'ANODE	RHÉOBASE (VOLTS)	CHRONAXIE (1)(farads 10^{-8})
13°	0.48	11.5
21°	0.44	11.5
13°	0.48	11.3

On voit que les variations de température sur le trajet de l'excitation ne modifient pas la chronaxie.

b) Courant descendant; le tube de verre, à température variable, est en contact avec la cathode, où naît l'excitation. Déterminations effectuées de 5 en 5 minutes.

TEMPÉRATURE DE L'ANODE	RHÉOBASE (VOLTS)	CHRONAXIE (farads 10^{-8})
13°	0.34	14.5
24°	0.37	9.5
13°	0.32	14.5

Le chauffage de la région cathodique entraîne une modification réversible de la chronaxie, l'excitation, naissant à la cathode.

3°) Si comme l'a fait Cardot (2) on modifie d'une façon étroitement localisée, par CO^2 , l'excitabilité de certains points d'une préparation neuromusculaire, on constate que la chronaxie varie seulement lorsque CO^2 agit à la cathode. Si on fait par exemple de l'excitation bipolaire sur le nerf, et que l'on fasse agir CO^2 entre les électrodes et le muscle (modification de l'excitabilité sur le trajet de l'excitation, en dehors des points où naît cette excitation), on n'observe aucune action de CO^2 sur la vitesse d'excitabilité. De même si l'on plonge dans CO^2 , la préparation entière, à l'exception du point où est appliquée la cathode. Inversement, il suffit de faire agir CO^2 sur la région du nerf

(1) La chronaxie est exprimée en farad 10^{-8} , elle correspond à la capacité dont la décharge produit le seuil de l'excitation en mettant en jeu le minimum d'énergie.

(2) *Henry Cardot*. Journ. de Physiologie et de Pathologie générales, juillet 1912.

qui est au contact de la cathode pour obtenir des modifications de la chronaxie, réversibles avec l'élimination de CO^2 .

La vitesse d'excitabilité, qu'on la mesure directement par la chronaxie, ou indirectement par la méthode de l'indice caractérise donc d'une façon étroite l'excitabilité du point où naît l'excitation. Si nous recherchons donc l'indice au point moteur du nerf, nous aurons la caractéristique directe des fibres nerveuses au point où est faite la détermination, indépendamment des altérations pathologiques qui ont pu porter sur la partie plus centrale ou plus périphérique du nerf, ou sur les muscles eux-mêmes.

J'ai donc recherché l'indice de vitesse au point moteur du nerf dans divers cas de dégénérescence. D'une façon générale on peut dire que dans les cas de réactions de dégénérescence très marquées, on obtient une baisse de l'indice extrêmement nette.

Voici des chiffres obtenus sur le facial à l'angle de la mâchoire, dans un cas de paralysie faciale a frigore en prenant comme seuil, les contractions dans l'orbiculaire inférieur des lèvres ou dans l'orbiculaire supérieur.

1) Mlle N. (voir ci-dessus observation III).

a) Seuils observés sur l'orbiculaire inférieur (Bobine de 3.350 ohms).

	DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
19 mai	7	13.25	330	39	8.5
2 juin	8.5	14	215	30	7.2
	8.75	14.25	196	28	7
9 juin	9.25	14	160	30	5.3
5 juillet	9	15.75	176	18.75	9.4

Voir graphique fig. 20 Courbe B.

b) Seuils observés sur l'orbiculaire supérieur.

18 mai	3.75	11.75	596	67	8.8
	4	11.6	582	70	8.3
2 juin	6.7/8	11.3/8	338	77	4.4
	6.7/8	11.5/8	338	70	4.8
13 juin	7.4/8	11.3/4	320	67	4.7
23 juin	6.5	12.1/4	365	57	6.4
	6.25	12.1/4	387	57	6.8

Les chiffres ci-dessus sont reportés sur la fig. 20, courbe A.

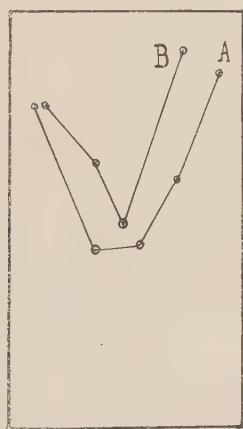


Fig. 20

Le phénomène est ici encore très net.

Cependant, je dois relater ici qu'il m'est arrivé en étudiant l'évolution de l'indice au point moteur du nerf au cours de la dégénérescence d'observer une fois une valeur de l'indice, élevée, tout à fait normale; il ne peut s'agir là d'une erreur d'observation, car, étonné par le fait je l'ai vérifié avec soin :

	DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTTÉS		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
23 mai 1911	7.75	15	274	22.5	12.1
	8	15	256	22.5	11.4

Ce fait, étonnant au premier abord, s'explique facilement si l'on songe que le facial, est constitué, pen-

dant l'évolution de la paralysie par un mélange de fibres qui sont à des degrés différents de dégénérescence suivant l'intensité avec laquelle elles ont été intéressées par la lésion. Il est même possible que des fibres soient restées complètement saines, et ces indices élevés, que l'on obtient accidentellement sont la preuve certaine de l'existence de fibres restées normales au milieu des fibres en voie de dégénérescence. Il est bien clair, en effet, que suivant la position de l'électrode différenciée, cette électrode peut mettre en jeu avec une plus grande facilité les fibres dégénérées ou les fibres restées normales, de sorte que l'on détermine l'indice correspondant aux unes, ou l'indice correspondant aux autres. Dans le cas d'une dégénérescence très forte, comme celle que nous étudions, on n'observe que très rarement l'indice à valeur élevée; c'est que les fibres saines y sont rares; cependant si l'explication que je suggère est exacte on doit pouvoir, en tâtonnant, en modifiant la position de l'électrode différenciée, mettre en jeu les fibres dégénérées ou les fibres saines, et obtenir un indice élevé ou un indice bas. C'est en effet ce qu'il est aussi facile de vérifier :

Le 19 juin 1911. Excitation du nerf facial à l'angle de la mâchoire; seuil observé sur l'orbiculaire supérieur: (3.390 ohms).

DISTANCE DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉ		INDICE
F.	O.	F.	O.	
7	12.125	330	59.5	5.5

On obtient un indice bas, signe de dégénérescence net; il est à noter que la contraction observée est *très lente à l'œil*. Si l'on déplace alors légèrement l'électrode différenciée en la reportant vers l'angle de la mâchoire un peu en arrière de sa position primitive, on obtient les chiffres suivants :

DISTANCE DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
F.	O.	F.	O.	
7.625	14.5	283	26	10.9

On obtient maintenant un indice élevé, attestant l'existence de fibres restées saines, que, pour la position choisie de l'électrode on excite sélectivement. En douterait-on encore un peu, que le fait suivant lèverait les derniers doutes : la contraction que l'on observe, dans ces déterminations est *nettement vive*, les fibres musculaires commandées par les fibres nerveuses restées saines étant elles aussi restées normales, c'est-à-dire rapides.

Nous avons constaté ce fait, le même jour, en observant les contractions non plus de l'orbiculaire supérieur, mais de l'orbiculaire inférieur.

	DISTANCE DES BOBINES EN CM.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICE
1 ^{re} détermination	9.5	13.875	145	31,5	4.6
2 ^e détermin. en	8	14.875	256	23	11.2
déplaçant l'électrode	8 375	14.875	225	23	9.8

Des contractions correspondant à la première détermination étaient nettement lentes, les contractions correspondant à la deuxième étaient nettement vives et rapides.

Ici encore l'indice de vitesse se montre un élément d'analyse très objectif et très pénétrant.

J'ai recherché également l'indice de vitesse au point moteur du nerf, dans les cas de polynévrites légères signalés plus haut (observ. X et XI) où l'examen électrique classique pratiqué au point moteur du muscle, ne révélait rien d'anormal, et où la recherche de l'indice au même point décelait au contraire un ralentissement très net.

Les résultats obtenus ont été très nets.

Avec une constance remarquable, l'indice de vitesse recherché au point moteur du sciatique poplité externe, a conservé une valeur sensiblement normale pendant toute la durée de l'évolution de la maladie; le résultat a été le même lorsque j'ai pris comme seuil les contractions dans l'extenseur commun des orteils; c'est dire que les fibres nerveuses se rendant à l'un et

à l'autre de ces muscles se sont comportées de façon identique.

Voici les chiffres obtenus.

Monsieur B. (Polynévrite). Voir ci-dessus obs. X.

Bobine de 3.390 ohms. Excitation du sciatique poplité externe à gauche; observation des seuils sur l'extenseur commun des orteils.

	DISTANCES DES BOBINES EN cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
13 mai 1911	6.5	13.5	365	36	10.1
	6.5	13.76	365	33	11
24 mai 1911	6.75	14.25	347	28	12.3
	6.50	14	365	30	12.1
10 juin 1911	4.3/4	13	512	42	12.2
29 juin 1911	1	11.3/4	860	67	12.8
	1.1/4	11.3/4	830	67	12.4

Pour faciliter la comparaison des résultats obtenus par la détermination de l'indice au point moteur (page 133) de l'extenseur commun des orteils gauche, d'une part, et au point moteur du sciatique poplité externe, j'ai rapproché dans un même tableau (ci-dessous), les deux séries de chiffres.

DATE	INDICES DÉTERMINÉS AU POINT MOTEUR DU MUSCLE	INDICES DÉTERMINÉS AU POINT MOTEUR DU NERF
1 ^{er} mai	7.6 ; 8	»
13 mai	8.6 ; 8.7	10.1 ; 11
24 mai	9	12.1 ; 12.3
10 juin	»	12.2
29 juin	9.1 ; 9.5	12.6

Voici maintenant des chiffres obtenus en excitant le nerf sciatique poplité externe droit, et en observant la contraction sur l'Extenseur commun Droit.

	DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
	F.	O.	F.	O.	
11 mai	7	14.25	330	28	11.8
24 mai	5.25	13.25	468	39	12
10 juin	5	13	490	42	11.6
29 juin	3.3/4	12.5	596	52	11.5

Dans le tableau ci-dessous se trouvent placées côte à côte les valeurs d'indice déterminées soit au point moteur du muscle soit au point moteur du nerf.

DATE	INDICES DÉTERMINÉS AU POINT	INDICES DÉTERMINÉS AU POINT
	MOTEUR DU MUSCLE	MOTEUR DU NERF
28 avril 1911	5.7 ; 3.7	»
1 ^{er} mai	5.3 ; 6	»
11 mai	»	11.8
13 mai	6.2	»
24 mai	6.2 ; 6.7	12
10 juin	8.3 ; 7.3	11.6
29 juin	10.1 ; 10.3	11.5

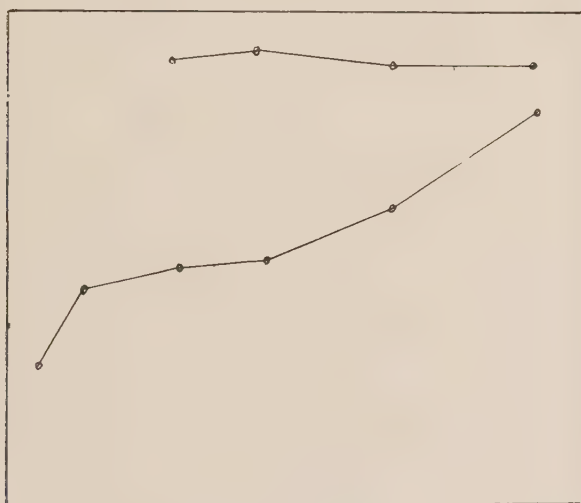


Fig. 21

La fig. 21, représente graphiquement les résultats ci-dessus; elle rend immédiatement saisissable ce fait que l'indice de vitesse a conservé une valeur élevée sur le nerf, alors qu'au point moteur, il avait considérablement diminué.

J'ai d'ailleurs obtenu des résultats analogues dans un autre cas de polynévrite (éthylque).

Monsieur B. Voir observation n° XI.

Le 24 août, alors que l'indice déterminé au point moteur du jambier antérieur droit était 6,— 6,1 (voir plus haut pag. 135) la recherche de l'indice au point moteur du nerf, en observant les contractions du même muscle, donnait les résultats suivants :

DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
F.	O.	F.	O.	
8	14.5	267	26.6	10
7.75	14.5	288	26.6	10.9

Le même jour, alors que l'indice déterminé au point moteur du jambier antérieur gauche était 6,3, la recherche de l'indice au point moteur du nerf donnait les résultats suivants :

DISTANCES DES BOBINES en cm.		SEUILS EN QUANTITÉS		INDICES
F.	O.	F.	O.	
5	12.75	524	47.5	11
2.5	11.75	745	67.5	11

Que signifient ces résultats ? Certes il faut attendre avant de se prononcer d'une façon définitive, que des recherches nouvelles plus nombreuses aient permis de savoir si ces faits sont constants dans toute les polynévrites, et si les conclusions que l'on peut en tirer, sont susceptibles d'être généralisées à tous les cas ; quoi qu'il en soit, et quels que soient les résultats que doivent donner des recherches ultérieures, il n'en restera pas moins établi que dans les cas étudiés l'indice a conservé une valeur élevée sur le nerf alors qu'il subissait une baisse considérable au point moteur ; ceci incline à penser, que dans ces sortes d'affections la lésion primordiale essentielle ne porte pas sur le tronc nerveux lui-même, mais sur des éléments beaucoup plus périphériques, dernières ramifications nerveuses, terminaisons motrices, plaque motrice (?) ou fibre musculaire elle-même. On peut apercevoir là une confirmation physiologique importante en faveur de la conception récemment discutée suivant laquelle dans les polynévrites, le processus pathologique initial siègerait dans les régions tout-à-fait terminales des ramifications nerveuses.

Arrivés au terme de l'exposé de ces recherches, nous croyons avoir montré combien la mesure de la vitesse d'excitabilité est une méthode délicate pour apprécier l'excitabilité réelle d'un tissu, et combien la voie nouvelle qui s'ouvre à l'électrodiagnostic peut être féconde en enseignements pour la connaissance de la physiologie pathologique des nerfs périphériques et des muscles. Nous ne nous dissimulons pas que les recherches que nous venons d'exposer ne sont qu'un commencement à toute une série de recherches, ou les différentes affections devront être minutieusement étudiées, ainsi que leurs différentes évolutions des points de vue nouveaux que nous avons exposés. Les résultats que nous venons d'exposer sont déjà suffisamment suggestifs et instructifs pour nous engager à poursuivre ces recherches avec ténacité. C'est ce que nous comptons faire.

Avant de terminer il nous reste à donner nous-mêmes la critique de la méthode que nous avons exposée, et à déterminer quels sont ses inconvénients, quelles sont ses limitations, dans quels cas elle peut-être partiellement utile, et dans quel cas au contraire elle est ou insuffisante ou complètement en défaut.

CHAPITRE V

Critique de la valeur de la méthode de mesure des indices de vitesse par les courants induits.

La méthode que nous venons de présenter comporte certaines limitations que nous devons exposer.

I). Tout d'abord, il est bien évident qu'elle s'applique aux seuls cas de muscles normaux ou dégénérés ayant conservé leur excitabilité faradique; on sait qu'au cours des dégénérescences très accentuées, les muscles et les nerfs deviennent inexcitables au courant faradique; certes il va de soi que la différence entre les courants faradiques et les courants galvaniques n'étant pas une différence de nature, mais bien une différence quantitative dans la durée du courant, on ne peut parler d'inexcitabilité faradique absolue coexistant avec une excitabilité galvanique quelconque. Il n'y a inexcitabilité faradique que relativement à la puissance des instruments dont on dispose; et il n'est pas douteux en particulier que, le diagnostic de DR complète étant généralement fondé essentiellement sur la présence de l'inexcitabilité faradique complète, les différents résultats obtenus et publiés par les différents auteurs, ne peuvent nullement être comparés; suivant qu'un malade a été examiné avec telle ou telle bobine, il est considéré aux termes de l'électrodiagnostic classique comme présentant de la DR partielle ou de la DR complète. Cette inexcitabilité faradique est donc relative à l'instrumentation que l'on utilise, et récemment encore M. Delherm et Laquerrière en ont donné une nouvelle preuve en montrant que l'on peut faire réapparaître une excitabilité faradique disparue en soumettant les tissus à des modifications électrotoniques.

Il n'y a donc pas d'inexcitabilité faradique absolue, et l'on peut penser qu'en modifiant l'instrumentation habituellement utilisée en électrodiagnostic, dans le sens d'une augmentation des quantités d'électricité induites, on pourrait arriver à étudier des dégénérescences qui échappent actuellement à l'examen faradique, et reculer ainsi les limites d'application de la méthode; déjà les bobines de 3390 ohms, et 2500 ohms que nous avons utilisées permettaient d'atteindre des niveaux d'excitabilité qui échappent aux bobines habituellement utilisées pour l'électrodiagnostic courant.

Il faut remarquer toutefois que les difficultés sont encore augmentées du fait que l'on a besoin d'obtenir le seuil pour l'onde de fermeture; et que souvent le seuil d'ouverture tombe dans les valeurs dont on dispose, tandis que le seuil de fermeture est hors de l'échelle utilisable. C'est ainsi que nous n'avons qu'exceptionnellement (dans des cas où la résistance de la peau était très faible, et l'excitabilité normale) pu obtenir le seuil de fermeture sur les muscles de la main; cette étude présenterait cependant un très grand intérêt pratique, car il y a un grand nombre de maladies où les lésions débutent par les petits muscles des mains.

II) Mais arriverait-on, à exciter au moyen des ondes d'induction relativement brèves, tous les muscles dans les cas de dégénérescence les plus avancés, la méthode indiquée n'en resterait pas moins dans ces derniers cas peu précise, étant donnée d'une part l'approximation de la mesure faite, et d'autre part, le peu de variation de l'indice pour des variations de vitesse considérable, lorsque ces vitesses sont très petites.

Nous avons montré en effet qu'il ne faut guère espérer dépasser l'approximation de 10 %, sur la mesure de l'indice; l'impossibilité où l'on se trouve d'obtenir du malade une résolution musculaire complète toujours analogue, et d'autre part, les très légères modifications que les variations de la résistance du secon-

daire font subir à la durée et à l'efficacité relatives des deux ondes, ces deux éléments d'incertitude font qu'il serait illusoire d'espérer dépasser l'approximation 10 %.

Or l'indice de vitesse ne traduit pas avec la même sensibilité à tous les niveaux les variations de vitesse; (voir plus haut : Théorie des indices de vitesse). Tant que les vitesses d'excitabilité restent normales, ou relativement élevées, l'indice est un réactif très sensible des altérations que subit la vitesse; mais lorsque celle-ci devient très faible, l'indice n'en est plus qu'une mesure très peu sensible. Nous avons vu par exemple dans l'échelle de chronaxies que nous avons prises, et pour des durées des deux ondes de fermeture et d'ouverture égales respectivement à 0.01 et 0.001 (ce qui est tout à fait l'ordre de grandeur du rapport des durées des deux ondes utilisées), que lorsque les chronaxies atteignent des valeurs de 0.01, il faut des variations de vitesse considérables pour produire des variations de l'indice dépassant l'approximation de sa mesure; on voit qu'à ce niveau l'indice n'est plus un réactif ni très fidèle ni très sensible pour suivre l'évolution du paramètre chronologique de l'excitation.

Il s'agit là de dégénérescences très marquées; on voit qu'il n'y a donc pas grand intérêt à poursuivre l'étude d'une instrumentation plus puissante, qui, mettant en jeu des quantités d'électricité beaucoup plus grandes, permettrait d'étendre les limites d'application de la méthode, puisque, pour les dégénérescences très accentuées, l'indice n'est plus un réactif sensible.

III) La méthode n'est théoriquement exacte qu'à l'approximation de l'exactitude de la loi d'excitation.

$$Q = A (t + \tau)$$

Cette loi est une loi linéaire; mais l'expérience a montré (Lapicque, Keith Lucas, Gildemeister et Otto Weiss) que pour les temps courts la courbe représentative de la loi des quantités s'infléchit en une conca-

vité dirigée vers les abscisses positives; ce phénomène est d'autant plus marqué et prend naissance pour des valeurs du temps d'autant plus grandes que l'on expérimente sur des muscles plus lents.

Si donc la durée de l'onde d'ouverture tombe dans la zone où la courbe des quantités présente une concavité, le rapport des quantités d'électricité liminaires, à l'ouverture et à la fermeture, représentera non pas l'indice réel du tissu, mais l'indice d'un tissu légèrement plus rapide, l'indice d'un tissu qui aurait comme loi des quantités non pas la courbe ABC, mais la droite à pente plus rapide A'B'C'; on obtiendra l'indice de vitesse d'un tissu ayant une chronaxie τ' au lieu de la chronaxie τ . (fig. 22).

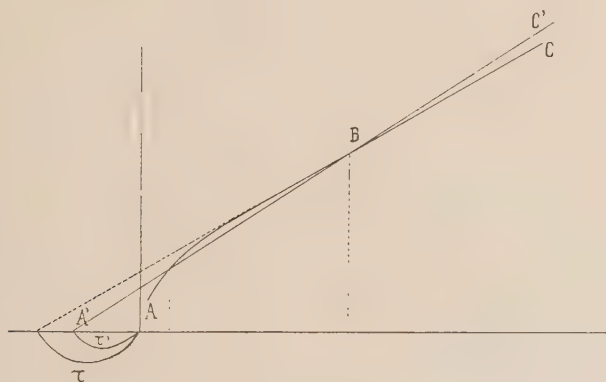


Fig. 22

L'erreur est vraisemblablement minime, mais il faut bien savoir 1°) qu'elle intervient pour donner des indices de vitesse légèrement plus élevés que les indices réels; 2°) qu'elle intervient d'une façon d'autant plus intense que l'on étudie des tissus plus lents, des tissus plus dégénérés par conséquent. Aussi à mesure qu'une dégénérescence évolue, l'indice tend à rester de plus en plus au dessus de sa valeur réelle; autrement dit la dégénérescence est dans tous les cas un peu plus forte que ne l'indique l'indice de vitesse.

IV) Que se passe-t-il dans le cas de mélanges de fibres saines et de fibres dégénérées ou dans les cas de mélanges de fibres, à des degrés de dégénérescences variables ?

Nous avons vu que parfois, il est possible, en modifiant la position de l'électrode différenciée et par conséquent son efficacité pour les différentes espèces de fibres d'exciter sélectivement les fibres lentes ou les fibres rapides, et d'obtenir par conséquent dans les déterminations successives l'indice des fibres rapides et l'indice des fibres lentes. Mais d'autres cas peuvent se présenter :

Soit un mélange de fibres à chronaxie τ et à chronaxie τ' , ces fibres sont caractérisées par deux lois d'excitation

$$Q = A (t + \tau)$$

$$Q' = A' (t + \tau')$$

or ces deux lois peuvent se couper pour une durée θ qui dans certains cas peut être intermédiaire aux durées t et t' des deux ondes induites utilisées; il est facile de voir que, dans ces conditions, le seuil à l'onde de fermeture est plus bas sur les fibres à grande chronaxie, et le seuil à l'onde d'ouverture est plus bas sur les fibres à petite chronaxie; c'est dire que les seuils que l'on déterminera seront observés sur le tissu rapide pour l'onde d'ouverture, et sur le tissu lent pour l'onde de fermeture; l'indice de vitesse déterminé correspondra donc à une droite dont la pente sera intermédiaire aux pentes respectives des deux premières droites; il représentera la vitesse d'un tissu dont la vitesse serait intermédiaire aux vitesses des deux tissus.

On voit que, dans ce cas encore, les indices de vitesse obtenus tendent à indiquer une dégénérescence moins avancée que celle qui existe réellement.

*
* *

La méthode de mesure de la vitesse d'excitabilité par les courants induits que nous avons exposée dans

ce travail, est donc seulement valable dans le cas de dégénérescences faibles ou moyennes; dans le cas de dégénérescences très fortes, ou bien, la méthode est insuffisante du fait de l'approximation trop faible, ou bien elle est complètement inutilisable du fait de la disparition de l'excitabilité faradique.

Si l'on se place à un point de vue pratique, la méthode apparaîtra comme particulièrement recommandable dans les cas de dégénérescences faibles. Elle est sur ce point d'une sensibilité qui dépasse de beaucoup les méthodes généralement usitées en électrodiagnostic; elle permet de faire avec une très grande précocité le diagnostic de lésion dégénérative sur un nerf ou un muscle.

En tout cas, atteignant d'une façon très pénétrante l'intimité du processus d'excitation, elle permet dans tous les cas où il est possible d'obtenir le seuil de fermeture, de côter les réactions de dégénérescence, de mesurer leur intensité, et de déterminer le sens dans lequel elles évoluent.

* *
* *

Les limitations et critiques que nous avons formulées atteignent évidemment d'une façon exclusive la méthode de mesure de la vitesse d'excitabilité par les courants induits. La nécessité de mesurer les paramètres chronologiques de l'excitation toutes les fois que l'on voudra caractériser l'excitabilité d'un tissu n'est est ni moins évidente, ni moins impérieuse. A tous ceux qui sont au courant des recherches électrophysiologiques de ces dix dernières années, à tous ceux qui savent quelle lumière l'étude de la vitesse d'excitabilité a jetée dans nos connaissances sur le fonctionnement des nerfs et des muscles, il apparaît en toute évidence, que dans un avenir plus ou moins lointain, après des tâtonnements plus ou moins longs, et des résistances plus ou moins vives, la mesure des paramètres chronologiques de l'excitation sera la base même de l'électrodiagnostic du système nerveux périphérique et du système musculaire.

Le travail que nous avons présenté constitue une première tentative dans cette voie; nous poursuivrons dans cette direction les recherches commencées; nous avons vu que les dégénérescences très accentuées échappent à la méthode que nous avons proposée; il faudra donc la compléter par une méthode permettant d'apprécier la vitesse d'excitabilité dans ces cas; diverses solutions peuvent être envisagées, nous comptons expérimenter la méthode suivante.

On sait que si l'on excite les tissus au moyen de courants lentement croissants, l'intensité liminaire est plus élevée que dans le cas où l'excitation est faite au moyen de courants galvaniques à début brusque. Plus la durée d'établissement est longue, plus l'intensité liminaire s'élève; et il y a une pente limite pour laquelle, le courant, quelque intensité qu'il atteigne reste complètement inefficace. Or cette pente limite est un paramètre de la vitesse d'excitabilité. De même si l'on mesure l'intensité nécessaire pour deux courants de pentes différentes, le rapport des deux valeurs trouvées est encore un « indice de vitesse » caractéristique du tissu considéré. Il y a donc là une méthode qui permettra d'apprécier la valeur du paramètre chronologique de l'excitation, même dans les cas où seule l'excitabilité galvanique est conservée; la seule difficulté de la méthode est la production facile des courants lentement croissants, les différents appareils (orthorhéonomes) qui ont été utilisés étant d'un maniement assez délicat; heureusement la difficulté peut être tournée; on sait que la rapidité d'établissement d'un courant dans un circuit dépend de la valeur du rapport $\frac{L}{R}$ dans ce circuit; on peut donc en introduisant dans le circuit d'excitation une grande self, obtenir des courants à établissement retardé; de simples variations de la résistance ohmique R du circuit permettront alors d'obtenir des durées d'établissement variables (1). On voit que cette méthode, très facile à appli-

(1) *Gildemeister*. (Loc. cit.) a utilisé ce procédé pour obtenir des courants à durée d'établissement variable.

quer aux besoins cliniques complètera la méthode de mesure de la vitesse d'excitabilité par les chocs d'induction, en permettant d'atteindre tous les niveaux de dégénérescence. Nous comptons dans des recherches ultérieures l'expérimenter sur l'homme en même temps que nous nous efforcerons de donner de la vitesse d'excitabilité chez l'homme, des mesures directes soit par les procédés rhéotomiques, soit par les décharges de condensateur.



CONCLUSIONS

— —

I') Les résultats obtenus en physiologie expérimentale et comparée, convergent pour montrer que la simple détermination d'une hauteur de seuil ne suffit pas à caractériser l'excitabilité d'un tissu. Ce qui conditionne essentiellement la hauteur du seuil, ce sont des contingences expérimentales (densité aux électrodes, forme des ondes excitantes); et les propriétés fondamentales de l'excitabilité d'un tissu (excitabilité aux courants lentement croissants, faculté de sommation, échelle absolue de durées à considérer dans la loi d'excitation du tissu) n'apparaissent pas comme liées à la hauteur du seuil.

II) Au contraire, la vitesse d'excitabilité du tissu, c'est-à-dire, la rapidité avec laquelle se développe dans le tissu, sous l'influence du courant, la perturbation excitante, est le phénomène qui conditionne pour ce tissu toutes les qualités fondamentales de son excitabilité que nous venons de citer; d'autre part, l'appréciation de la vitesse d'excitabilité est dans une très large mesure indépendante des contingences expérimentales sans signification qui influent sur la hauteur des seuils.

III) L'excitabilité d'un nerf, sa conductibilité et l'excitabilité et la contractilité du muscle, étant des propriétés qui sont physiologiquement accordées, la simple connaissance de la vitesse d'excitabilité ou de l'un de ses paramètres, renseigne sur les autres propriétés du système neuromusculaire considéré (vitesse de l'influx moteur dans le nerf, fréquence et durée des ondes de négativité qui accompagnent son fonctionnement, période latente et durée de la contraction musculaire, nombre d'excitations par seconde nécessaires pour mettre en téтанos le système considéré).

IV) On peut considérer comme des paramètres de la vitesse d'excitabilité les différentes grandeurs suivantes :

1°) La *chronaxie* (variant comme l'inverse de la vitesse d'excitabilité) ou durée nécessaire à l'obtention du seuil lorsque l'intensité du courant est double de celle qui est liminaire pour un courant constant indéfiniment prolongé.

2°) La durée de passage au dessus de laquelle le temps de passage cesse d'influer sur l'intensité liminaire.

3°) La pente limite, c'est-à-dire la pente la moins abrupte suivant laquelle un courant peut s'établir tout en restant efficace.

4°) Le rapport des intensités nécessaires à produire le seuil de la contraction pour un courant s'établissant d'une façon brusque, et pour un courant s'établissant suivant une pente déterminée (diviseur de l'excitation).

5°) Le rapport des quantités d'électricité liminaires à l'onde de fermeture et à l'onde d'ouverture de la bobine d'induction (indice de vitesse).

V) L'indice de vitesse, exprimant le rapport d'efficacité des deux ondes de fermeture et d'ouverture de la bobine, tous les facteurs qui modifient les caractéristiques physiques de ces deux ondes, et en particulier leur durée relative, modifient de ce fait la valeur de l'indice; mais pour une instrumentation une fois déterminée la valeur de l'indice ne dépend que de l'excitabilité du tissu considéré. Pour rechercher l'indice de vitesse sur l'homme il faut de toute nécessité :

1°) Obtenir du sujet une résolution musculaire complète;

2°) Déterminer les deux seuils de fermeture et d'ouverture avec l'électrode différenciée négative;

3°) Déterminer ces deux seuils au même point du tissu;

4°) Produire la fermeture et l'ouverture du circuit primaire avec un système d'interruptions le plus régulier et le plus constant possible.

VI) Dans ces conditions on observe que :

1°) L'indice est constant sur un muscle donné chez les différents individus, à l'état normal;

2°) Les différents muscles de l'homme normal présentent des indices très peu différents les uns des autres;

3°) A l'état normal, on obtient le même indice, que l'électrode différenciée soit placée au point moteur du nerf, au point moteur du muscle, ou en plein muscle;

4°) Au cours des dégénérescences l'indice de vitesse diminue considérablement de valeur; dans tous les cas pathologiques s'accompagnant de réactions de dégénérescences il prend des valeurs très inférieures aux valeurs normales. Cette baisse de l'indice est beaucoup plus précoce que l'apparition des phénomènes de lenteur qui permettent à l'examen électrique classique de diagnostiquer une DR en évolution;

5°) L'indice de vitesse caractérisant l'état du point excité, sa détermination, à l'état pathologique, avec l'électrode différenciée négative au point moteur du nerf, ou au point moteur du muscle permet d'analyser l'état respectif des différentes parties du système nerf-muscle étudié.

VII) En somme, l'indice de vitesse, nettement indépendant de la hauteur absolue des seuils, atteint une caractéristique objective profonde et intime de l'excitabilité des tissus; il traduit dans le domaine excitation, les phénomènes de rapidité ou de lenteur plus ou moins grande que l'on observe dans le domaine contraction. Il permet par deux déterminations qui réduisent au maximum la place laissée à l'interprétation personnelle, d'affirmer le début d'une lésion dégénérative avec une précocité remarquable, à une période où les métho-

des habituelles restent muettes. Permettant de coter une réaction de dégénérescence, il permet d'en suivre l'évolution; en définitive, il ouvre la voie à tous les progrès que l'on réalise dans un domaine scientifique quelconque, lorsque l'on satisfait au « besoin de mesure » et lorsque l'on substitue à une simple appréciation qualitative des faits, une mesure quantitative précise.

APPENDICE. - Graduation des bobines.

Nous n'entrerons pas ici dans l'étude complète et détaillée de tous les procédés qui ont été donnés pour graduer les appareils d'induction, ou pour obtenir une mesure exacte des caractéristiques physiques des courants induits. On a proposé une espèce de graduation physiologique : Fleischl (1) recherche pour chaque distance des bobines quelle est dans le primaire, l'intensité nécessaire pour l'obtention du même effet physiologique : pour cela, dans le secondaire se trouve une préparation neuromusculaire, et l'auteur observe sur elle le seuil de la contraction. Il obtient les variations d'intensité dans le primaire, en y introduisant des longueurs différentes d'un rhéostat liquide. Mais à chaque expérience, le rapport $\frac{I}{K}$ du primaire varie, de sorte que les différentes déterminations sont faites pour des ondes de durées différentes, et il est certain que la graduation ainsi obtenue n'est plus valable, lorsque, laissant le primaire inchangé, on modifie les intensités du secondaire par déplacement des bobines l'une par rapport à l'autre¹.

Fick (2) le premier a proposé de graduer le chariot d'induction en mesurant pour chaque distance des bobines la déflexion éprouvée par un galvanomètre à miroir (Spiegelbussole de Meissner) placé sur le secondaire, et mesurant l'intégrale de l'onde induite sans se préoccuper de son décours chronologique, (zeitlichen Verlauf). Kronecker (3) a repris et modifié cette méthode, d'une manière qui permet de rendre les appareils d'in-

(1) *Fleischl*. Ueber die Graduierung elektrischer Induktionsapparate. (Wiener. akad. Sitzungsberichte. Math. phys. Cl. 3. Abth

• IXXII

(2) *Fick*. Untersuchungen über elektrische Nervenreizung (Braunschweig 1864).

(3) *Kronecker*. Arbeiten aus d. physiologischen Anstalt zu Leipzig 1871.

duction relativement comparables entre eux, en les étalonnant par rapport à un même appareil, à constantes de construction connues. Kronecker oppose sur un même circuit comprenant un appareil de zéro (galvanomètre, téléphone, etc.), les circuits secondaires des bobines, graduée et à graduer. Il existe actuellement dans divers laboratoires des bobines graduées et étalonnées d'après la méthode de Kronecker, et qui permettent dans une certaine mesure de comparer entre eux les résultats obtenus par différents expérimentateurs.

Ces différentes modes de graduations sont empiriques.

D'autre part et par diverses voies, différents auteurs se sont efforcés de déduire théoriquement l'efficacité des ondes induites des caractéristiques physiques des bobines, et ils ont essayé de donner des procédés permettant de réaliser à volonté des ondes induites d'efficacité déterminée. C'est notamment aux dernières recherches de Martin (1) et de Gildemeister (2), qu'il faut se reporter si l'on veut connaître l'état actuel de la question. Martin a donné des formules qui permettent de calculer l'efficacité excitante des chocs d'induction de fermeture et d'ouverture, quand on connaît les constantes physiques des deux bobines. Mais la question est extrêmement complexe et délicate, elle n'est pas encore complètement élucidée, et son exposé complet sortirait du cadre de cette étude.

(1) *E. Martin*. A quantitative study, of faradic stimulation.

I. The variable factors involved (*American Journal of Physiology*, 22, p. 61-74).

II. The calibration of the inductorium for break shocks (*ibid.* 22, p. 116-122).

III. The measurement of make shocks (*ibid.* 24, p. 269-285).

IV. The make and breakkey (*ibid.* 26, p. 181-190).

V. The influence of tissue resistance and kathode surface on stimulating effectiveness (*ibid.* 27, p. 226-239).

VI. The comparison of one inductorium with another (*ibid.* 28, p. 49-60).

(2) *Gildemeister*. Inductionstrome als Reize. *Pfluger's Archiv* T. 131. p. 601, 1910.

Il nous suffisait de connaître, étant donnée la méthode que nous voulions appliquer, pour chacune des positions de nos bobines, quelle était la quantité d'électricité induite, tant à la fermeture qu'à l'ouverture. Cette graduation s'effectue au moyen d'un galvanomètre balistique.

Ces galvanomètres (1) sont des modèles dans lesquels on a considérablement augmenté le moment d'inertie de l'équipage mobile, ce résultat étant obtenu en chargeant le système aussi loin que possible de son axe de rotation, avec des poids (en l'espèce sur le modèle que nous utilisions — Hartmann et Braùn — de petites masses de cuivre sphériques que l'on déposait dans des cuillerons, situés symétriquement par rapport à l'axe de rotation de l'équipage). De cette façon, le système est considérablement alourdi, et ses déplacements ne suivent plus d'une façon exacte les variations rapides dans l'intensité du courant qui le traverse; bien plus si l'on envoie des ondes suffisamment courtes, il est possible que toute l'onde électrique soit passée au moment où l'équipage commence son oscillation; dans ces conditions l'élongation donnée par l'équipage, mesure, non plus les intensités atteintes dans le circuit, mais la quantité d'électricité qui a passé dans le galvanomètre. On voit que dans la transformation d'un galvanomètre ordinaire (qui mesure les intensités) en un galvanomètre balistique (mesurant les quantités), il faut réaliser un optimum, et éviter deux inconvénients opposés. Il faut le surcharger assez, pour qu'il soit nettement balistique, c'est-à-dire pour que ses élongations soient proportionnelles aux quantités d'électricité mises en jeu, et cependant, laisser le cadre assez léger pour conserver à l'appareil une sensibilité suffisante.

Il y a donc avantage à vérifier les qualités de son galvanomètre; pour cela il suffit de réaliser les épreuves suivantes que conseille G. Weiss.

(1) Voir à ce sujet G. Weiss. *Technique d'Electrophysiologie* Masson, Gauthier Villars et Fils.

« 1°) Vérifier, que la déviation est toujours la même pour une même décharge, quelle que soit la résistance intercalée, dans de certaines limites bien entendu, en la portant par exemple de 0 à 100.000 ohms. » Si l'on charge un condensateur de capacité C. à un voltage V. la quantité d'électricité que la décharge met en jeu est $Q = CV.$, elle est indépendante de la résistance du circuit de décharge : en faisant varier cette résistance, on fait varier, et la durée de la décharge, et l'intensité sous laquelle elle passe. En effet, si cette décharge traverse des circuits de résistance R. et R' l'intensité initiale est :

$$\text{dans le 1}^{\text{er}} \text{ cas} \quad I_0 = \frac{V}{R}$$

$$\text{dans le 2}^{\text{e}} \text{ cas} \quad I'_0 = \frac{V}{R'}$$

Les intensités au temps t sont :

$$I_t = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$I'_t = I'_0 e^{-\frac{t}{R'C}}$$

On voit que ces décharges, ont des durées différentes, des intensités différentes, et seulement des quantités d'électricité égales; si dans les deux cas les déviations sont égales, c'est que le galvanomètre mesure les quantités.

2°) « Vérifier que si l'on fait varier la self induction du circuit en y intercalant une bobine, on n'observe pas de différence ».

3°) « Que si l'on prend un condensateur que l'on porte à des potentiels variables, on a des déviations proportionnelles aux quantités d'électricité mises en jeu ».

Exemple, on chargera un condensateur de capacité C aux voltages V. 2V. 3V. 4V. etc. Dans ces conditions les quantités d'électricité mises en jeu sont respectivement :

CV
2 CV
3 CV
4 CV etc.

On vérifiera que les élongations du galvanomètre sont respectivement comme 1. 2. 3. 4.

Pour graduer le chariot d'induction, on relie donc la bobine induite avec le galvanomètre par l'intermédiaire d'une résistance R en série, et, se plaçant à la distance extrême des bobines on recherche quelle est l'élongation produite dans le galvanomètre; la lecture est faite au moyen d'une lunette, ou bien un rayon lumineux est envoyé sur le miroir du galvanomètre, et l'on observe le déplacement du rayon réfléchi sur une échelle graduée; c'est cette deuxième méthode que nous utilisons.

On lit donc pour la distance extrême des bobines quelle est la déviation du galvanomètre; puis on rapproche les bobines de 1. 2. 3. etc. cm. et on note à chaque fois la déviation correspondante; ces déviations successives donnent le rapport des quantités d'électricité induites aux différentes positions soit à la fermeture, soit à l'ouverture; si l'on a primitivement déterminé quelle élongation donne une quantité connue d'électricité (par exemple 1 microcoulomb obtenu en déchargeant dans le galvanomètre une capacité de 1 microfarad chargé à un potentiel de 1 volt.), on peut par un calcul simple, connaître les quantités absolues d'électricité induites pour chaque distance des bobines. Il est bon de faire 2 ou 3 déterminations pour chaque distance, et de prendre une moyenne des déviations lues sur l'échelle.

Mais ces déviations ne sont proportionnelles aux quantités d'électricité induites qu'à une condition, c'est qu'elles restent suffisamment petites; or, à mesure que l'on rapproche les bobines la quantité d'électricité induite augmente, et parallèlement la déviation du galvanomètre; il faut donc assez rapidement diminuer la quantité d'électricité induite d'une manière connue de façon à ce que les déviations restent dans les limites de l'échelle où elles sont proportionnelles aux quantités;

pour cela, il suffit d'introduire dans le secondaire une résistance convenable; on sait que la quantité d'électricité induite est donnée par la formule.

$$Q = L \frac{I}{R}$$

ou L est le coefficient d'induction mutuelle des bobines.

I l'intensité du courant primaire.

R la résistance du secondaire.

On fera donc, sans rien changer à I et à L , en conservant la même distance des bobines, une série de déterminations avec la résistance R , puis une série avec une résistance R' ; on obtiendra deux déviations différentes, correspondant aux différences des quantités induites dans les deux cas, et le rapport de ces quantités permettra de raccorder les deux graduations partielles effectuées l'une avec résistance R , l'autre avec une résistance R' .

On fait ainsi toute une série de graduations partielles, jusqu'à ce que les bobines soient complètement engainées, et on les raccorde. Puis, on en fait une courbe permettant de connaître les quantités d'électricité induites pour les points intermédiaires à ceux que l'on a déterminés. Les déterminations peuvent être faites par exemple de centimètre en centimètre de distance des bobins, et l'on peut lire sur la courbe par une interpolation graphique les quantités pour les $1/4$ et même les $1/8$ de centimètre.

Pour utiliser commodément dans les recherches physiologiques, cette graduation, il faut pouvoir éviter la lecture, toujours pénible, et délicate, d'une courbe sur papier millimétrique. Il y a donc avantage, la courbe étant une fois construite, à dresser un tableau, donnant par lecture immédiate pour chaque distance des bobines (par $1/4$ ou $1/8$ de cm) la quantité induite correspondante.

Exemple de graduation. — Prenons comme exemple la graduation de l'une des différentes bobines que nous avons utilisées : la bobine de 2.500 ohms.

La force électromotrice dans le primaire est de 1.95 V.; une résistance R sans self, formée de crayons Conté se trouve dans le circuit induit en série avec le galvanomètre balistique. On lit sur l'échelle graduée, les élongations du galvanomètre à l'ouverture du primaire. Pour chaque distance des bobines on fait plusieurs lectures au galvanomètre, et on utilise la moyenne de ces déterminations.

DISTANCE DES BOBINES en cm.	DÉVIATIONS SUCCESSIVES LUES SUR L'ÉCHELLE, en mm.	MOYENNE
40	20 ; 20 ; 19 ; 21 ;	20
38	23 ; 25 ; 24 ;	24
36	29 ; 30 ; 29 ; 30 ;	29.5
34	35 ; 35 ; 35 ;	35
32	43 ; 42 ; 41 ; 42 ;	42
30	50 ; 50 ;	50
28	64 ; 66 ; 65 ;	65
26	79 ; 81 ;	80
24	100 ; 105 ; 100 ; 103 ;	102
22	136 ; 135 ;	135.5
20	188 ; 188 ;	188
19	231 ; 225 ; 228 ;	228

A ce moment, les déviations du galvanomètre commençant à prendre une amplitude telle, que l'on peut craindre que ses élongations ne soient plus proportionnelles aux quantités d'électricité qui passent, on substitue dans le circuit secondaire une nouvelle résistance R' à la résistance R, R' étant environ 10 fois plus grand que R; et on continue la graduation, en faisant de nouvelles déterminations, dans ces nouvelles conditions expérimentales, pour la distance 19, ce qui permettra de raccorder les deux graduations partielles :

DISTANCE DES BOBINES en cm.	DÉVIATIONS SUCCESSIVES LUES SUR L'ÉCHELLE en mm.	MOYENNE
19	23 ; 22 ; 24 ; 23 ;	23
18	29 ; 30 ; 28 ;	29
17	35 ; 36 ;	35.5
16	45 ; 46 ;	45.5
15	58 ; 57 ;	57.5
14.5	67 ; 69 ;	68
14	80 ; 78 ;	79
13.5	91 ; 92 ;	91.5
13	108 ; 107 ;	107.5
12.5	127 ; 123 ; 125 ; 127 ; 123 ;	125
12	142 ; 147 ; 148 ; 143 ; 145 ;	145
11.5	168 ; 169 ; 167 ;	168
11	194 ; 194 ;	194

A ce moment, on substitue dans le secondaire à la résistance R' une résistance R'' , plus grande que R' , et on continue la graduation, en faisant de nouvelles déterminations pour la distance des bobines à 11 cm.

11	28 ; 28 ;	28
10.5	33 ; 33 ;	33
10	38 ; 40 ; 39 ;	39
9.5	48 ; 46 ;	47
9	54 ; 55 ; 53 ;	54
8.5	59 ; 59 ;	59
8	72 ; 70 ; 71 ;	71
7	91 ; 94 ; 90 ; 93 ;	92
6	116 ; 114 ; 112 ;	114
5	134 ; 137 ; 137 ;	136
4	162 ; 162 ;	162
3	180 ; 182 ; 181 ;	182
2	199 ; 202 ; 201 ; 200 ; 198 ;	200
1	210 ; 216 ; 213 ;	213
0.5	217 ; 219 ; 222 ; 218 ;	219
0	227 ; 222 ; 221 ; 222 ;	223

Les élongations obtenues permettent de tracer une courbe représentant la variation de la quantité d'électricité induite en fonction de la distance des bobines, à condition de raccorder les graduations partielles en utilisant un coefficient de transformation quand on passe d'une graduation partielle à une autre.

Exemple : Si nous dressons notre courbe en prenant pour l'abscisse 0, l'ordonnée 223, toutes les elongations lues sur l'échelle seront utilisables et pourront être directement portées en graphique jusqu'à l'abscisse correspondant à une distance des bobines égale à 11. Mais pour les distances des bobines allant de 11 à 19, il faut réduire de la manière suivante :

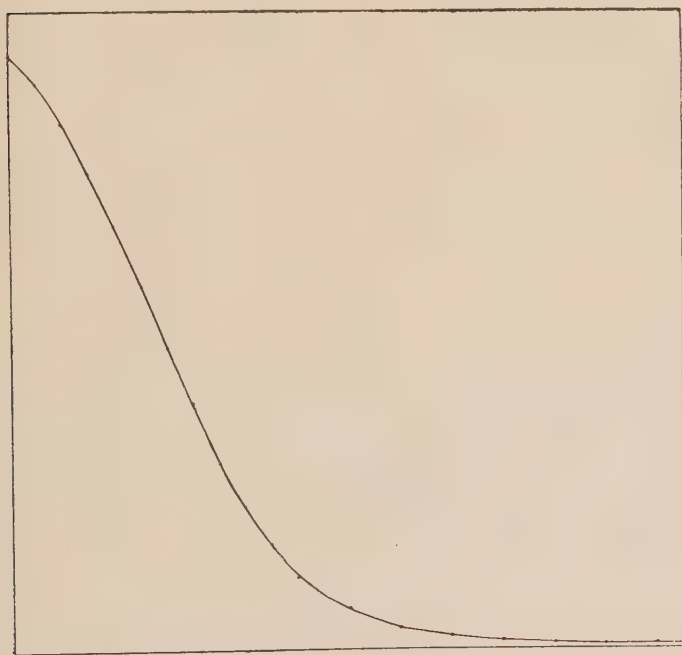


Fig. 23

Pour la même distance des bobines (11 cm), avec la résistance R'' dans le circuit induit la déviation est, de 28 mm.; avec la résistance R , elle est 194; pour raccorder la graduation faite suivant R' avec la graduation faite suivant R'' , il faut évidemment réduire toutes les déviations obtenues avec R' dans le rapport de 194 à 28. Pour raccorder la graduation (R') à la graduation (R'') il suffira de multiplier chacune des déviations ob-

tenues avec R' par le rapport $\frac{28}{194}$, coefficient de transformation.

On fera de même pour raccorder la graduation (R); aux deux graduations R' R'' , et l'on obtiendra ainsi une série de chiffres représentant la variation de la quantité d'électricité induite, en fonction de la distance des bobines. On obtient ainsi la courbe représentée sur la fig. 23.

Nous avons tracé ensuite la courbe de graduation sur papier millimétrique à grande échelle; après quoi, pour la commodité de l'utilisation nous avons dressé un tableau donnant par lecture directe la quantité d'électricité induite pour toutes les distances par $1/8^e$ de cm.

Nous reproduisons ci-contre ce tableau (1), jusqu'à la distance de 25 cm. des bobines seulement, parce que jamais nous n'avons eu à utiliser des distances plus grandes.

Nous avons utilisé au cours de nos recherches plusieurs autres bobines secondaires, avec toujours la même bobine primaire. Nous reproduisons ici la courbe de graduation (sur la fig. 24) et le tableau correspondants à une bobine secondaire de 3.390 ohms. Voici les déviations galvanométriques lues, pour la graduation de cette bobine.

(1) Il ne faut pas s'étonner si les chiffres du tableau oscillent légèrement autour des chiffres qui résulteraient directement des lectures galvanométriques; les chiffres du tableau, étant lus sur la courbe résultent d'une interpolation graphique; la courbe est continue, elle passe quelquefois légèrement en-dessus ou en dessous des points expérimentaux. On remarquera d'autre part sur la courbe des zones dans lesquelles il serait illusoire de vouloir différencier cette courbe d'une droite pure et simple. Dans ces cas, on fait une erreur moindre en calculant les quantités d'électricité, supposées varier dans ces limites proportionnellement aux distances qu'en essayant de lire sur la courbe. C'est ce qui explique dans le tableau, des chiffres de quantité comme 2,475; 2,425; etc., qui sont évidemment non des chiffres lus mais des chiffres calculés.

Tableau de graduation de la bobine de 2500 ohms.

CENTIMÈTRES	FRACTIONS DE CENTIMÈTRE							
	+ 0	+ 1/8	+ 1/4	+ 3/8	+ 1/2	+ 5/8	+ 3/4	+ 7/8
0 cm.	465	462	460.5	458	456	453	450.5	418
1 cm.	445	441	438	435	431	426	422	418
2 cm.	414	410	405	400	396	391	386	381
3 cm.	376	370	365	360	354	348	343	338
4 cm.	332	326	320	315	309	304	298	292
5 cm.	287	281	275	269	263	257	251	245
6 cm.	239	234	228	223	217.5	211	205	199
7 cm.	193	188	182.5	177	172	166	160	154
8 cm.	148	143	139	134	129.5	126	122	117.5
9 cm.	113	108.5	104	100	96.5	93	89	85.5
10 cm.	82	79	75.5	72	69	66.5	64	61
11 cm.	58.5	57	55	53	51	49	47.3	45.5
12 cm.	43.7	42	40.4	38.8	37.2	36	34.7	33.5
13 cm.	32.3	31	29.7	28.5	27.2	26.2	25.2	24.2
14 cm.	23.2	22.4	21.6	20.8	20	19.4	18.7	18
15 cm.	17.4	16.8	16.32	15.8	15.25	14.9	14.52	14.2
16 cm.	13.8	13.3	12.82	12.43	12.05	11.69	11.32	11
17 cm.	10.6	10.3	10.1	9.8	9.6	9.4	9.15	8.9
18 cm.	8.7	8.5	8.2	8	7.7	7.5	7.3	7.1
19 cm.	6.9	6.7	6.55	6.4	6.2	6	5.97	5.8
20 cm.	5.75	5.6	5.52	5.4	5.3	5.23	5.07	4.96
21 cm.	4.85	4.76	4.67	4.58	4.5	4.4	4.3	4.2
22 cm.	4.1	4.02	3.94	3.87	3.8	3.75	3.68	3.61
23 cm.	3.55	3.48	3.42	3.36	3.3	3.25	3.2	3.15
24 cm.	3.1	3.05	3	2.95	2.90	2.85	2.8	2.75
25 cm.	2.7	2.65	2.6	2.55	2.5	2.475	2.45	2.425

1° *Graduation partielle.* — Résistance R.

DISTANCE DES BOBINES en cm.	DÉVIATIONS SUCCESSIVES LUES SUR L'ÉCHELLE, en mm.	MOYENNE
40	21 ; 21 ;	21
38	24 ; 25 ; 23	24
36	30 ; 30	30
34	33 ; 34 ; 35 ;	34
32	42 ; 42	42
30	52 ; 53 ; 51	52
28	64 ; 66	65
26	81 ; 81	81
24	105 ; 103	104
22	137 ; 137	137
20	191 ; 195 ; 193	193
19	230 ; 230 ; 230	230

2° *graduation partielle*; résistance $R' > R$.

19	23. 23. 23	23
18	28. 28	28
17	36. 36	36
16	45 ; 45	45
15	56 ; 58	57
14	79 ; 79	79
13	109 ; 108 ; 107	108
12	149 ; 151	150
11	225 ; 222 ; 221 ; 221 ; 221	222

3° *graduation partielle*; résistance $R'' > R' > R$.

11	42 ; 42 ;	42
10	62 ; 62 ;	62
9	90 ; 88 ; 87 ;	89
8	124 ; 122 ; 125 ; 126	124
7	163 ; 161	162
6	205 ; 209 ; 207	207
5	252 ; 249 ; 249	250

4° *graduation partielle*; résistance $R''' > R'' > R' > R$.

5	139 ; 141	140
4	167 ; 168 ; 167 ; 160	168
3	187 ; 189	188
2	218 ; 210	210
1	229 ; 227 ;	228
	240 ; 240	240

Il suffit de raccorder suivant le procédé indiqué, les différentes graduations partielles ainsi obtenues pour obtenir la courbe de graduation représentée (fig. 24) et le tableau correspondant.



Fig. 24

Il serait fastidieux de donner toutes les graduations de nos bobines, d'autant que pour certaines, nous avons

Tableau de graduation de la bobine de 3390 ohms

DISTANCE en cm.	+ 0	+ 1/8	+ 1/4	+ 3/8	+ 1/2	+ 5/8	+ 3/4	+ 7/8
0 cm.	900	896	891	887	882	877	871	864
1 cm.	859	850	842	833	825	815	806	797
2 cm.	788	775	763	754	745	734	724	714
3 cm.	704	693	683	674	665	653	642	632
4 cm.	622	611	601	587	574	560	547	536
5 cm.	524	511	498	486	475	463	452	441
6 cm.	431	418	406	395	384	373	361	350
7 cm.	338	330	323	315	307	297	288	277
8 cm.	267	257	248	235	228	217	207	197
9 cm.	188	180	173	165	158	150	142	136
10 cm.	131	124	117.5	112	106	102	98	94
11 cm.	91	87	84	79	74	71	67.5	64
12 cm.	60	58	55.6	53.5	51.5	49.5	47.5	45
13 cm.	43	41	38.7	37.8	36.8	35.7	34.7	33.4
14 cm.	31.5	30	28.5	27.5	26.6	25.5	24.5	23.7
15 cm.	23	22.1	21.2	20.75	20.3	20.1	18.95	18.5
16 cm.	18	17.4	16.9	16.4	15.9	15.5	14.95	14.5
17 cm.	14	13.6	13.2	12.8	12.4	12.05	11.7	11.3
18 cm.	11	10.75	10.52	10.2	9.9	9.7	9.5	9.3
19 cm.	9.1	8.9	8.7	8.5	8.3	8.15	8	7.8
20 cm.	7.7	7.55	7.4	7.25	7.1	6.95	6.8	6.6
21 cm.	6.5	6.37	6.25	6.125	6	5.875	5.75	5.62
22 cm.	5.5	5.42	5.35	5.27	5.2	5.1	5	4.9
23 cm.	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.32	4.25	4.1
24 cm.	4.1	4.05	4	3.95	3.9	3.85	3.8	3.7
25 cm.	3.7	3.63	3.57	3.51	3.45	3.41	3.37	3.3

dû faire plusieurs graduations successives, de légères modifications ayant été apportées à l'enroulement du primaire, modifications qui agissaient de façon notable sur la courbe de graduation. Il nous suffira d'avoir exposé ici la technique de graduation et d'en avoir donné en détails deux exemples.

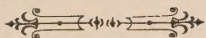


TABLE DES MATIÈRES

	Pages
I). INTRODUCTION	7
II). PREMIÈRE PARTIE. — La loi d'excitation et la notion de vitesse d'excitabilité.	
CH. I). — La loi d'excitation.....	15
1 ^o) Etude au moyen de décharges de condensateur.....	16
2 ^o) Etude au moyen des ondes rectangulaires.....	22
CH. II). — La notion de vitesse d'excitabilité.....	31
III). DEUXIÈME PARTIE. — Principe de la mesure de la vitesse d'excitabilité au moyen du rapport des quantités d'électricité liminaires pour l'onde de fermeture et pour l'onde d'ouverture de la bobine d'induction.	
CH. I). — Théorie des indices de vitesse.....	50
CH. II). — La bobine d'induction.....	58
1 ^o) Caractéristiques physiques des deux ondes de fermeture et d'ouverture de la bobine d'induction..	61
2 ^o) Efficacité physiologique relative des ondes de fermeture et d'ouverture de la bobine d'induction.	70
IV). TROISIÈME PARTIE. — Vitesse d'excitabilité chez l'homme à l'état normal et dans différents états pathologiques.	
CH. I). — Historique. - Recherches de DOUMER, REISS, CLUZET	80
CH. II). — Technique. - 1 ^o Dispositif instrumental...	99
2 ^o Technique d'une détermination.....	104
CH. III). — Résultats obtenus sur les muscles normaux.	106
CH. IV). — Résultats obtenus sur l'homme dans divers états pathologiques.....	121
1 ^o) Variation de l'indice de vitesse au cours de dégénérescences diverses	121
2 ^o) Évolutions de dégénérescences, suivies au moyen de l'indice	136
3 ^o) Indice de vitesse déterminé au point moteur du nerf.....	142
CH. V). — Critique de la valeur de la méthode de mesure des indices de vitesse par les courants induits.	154
V). CONCLUSIONS.....	163
Appendice. - Graduation des bobines d'induction....	167

